

**MODELO DE OPTIMIZACION DE USO DE ENERGIA EN SISTEMAS DE
BOMBEO**

.

BERNARDO ROGER SABOGAL ABRIL



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRONICA
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRIA EN INGENIERIA ENFASIS EN INGENIERIA ELECTRICA
SANTIAGO DE CALI
2013**

**MODELO DE OPTIMIZACION DE USO DE ENERGIA EN SISTEMAS DE
BOMBEO**

BERNARDO ROGER SABOGAL ABRIL

**Trabajo de Investigación para optar el titulo de Magister en Ingeniería con
énfasis en Ingeniería Eléctrica**

Director: Jairo Arcesio Palacios Peñaranda Ph.D

Grupo de Investigación: CONVERGIA



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRONICA
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRIA EN INGENIERIA ENFASIS EN INGENIERIA ELECTRICA
SANTIAGO DE CALI
2013**

PAGINA DE ACEPTACION

Nota de aceptación

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

Santiago de Cali _____ _____ de _____
 Día **Mes** **Año**

PAGINA DE AGRADECIMIENTOS

A mi director de proyecto por su tino en la selección de este proyecto y guía en la realización del mismo.

A la Universidad Autónoma de Occidente por todo el apoyo que me han brindado para poder culminar este trabajo

PAGINA DE DEDICATORIA

A mis padres que me inculcaron la disciplina y constancia para lograr los objetivos propuestos.

A mi esposa y mis hijos que silenciosamente entendieron el sacrificio y la dedicación que implica el desarrollo de un trabajo con responsabilidad

CONTENIDO

	pág.
1 TITULO	15
2 DEFINICION DEL PROBLEMA	16
3 JUSTIFICACION.....	18
4 OBJETIVOS.....	20
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	20
5 DESARROLLO	22
5.1 SISTEMA DE BOMBEO Y BANCO DE PRUEBA	24
5.2 PROCEDIMIENTO, CALCULOS Y MEDICIONES	27
5.3 MODELO O SECUENCIA DE PASOS PARA OPTIMIZACIÓN DE USO DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE BOMBEO	36
5.4 MONTAJE Y MEDICIONES A VELOCIDAD CONSTANTE	51
5.5 MONTAJE Y MEDICIONES A VELOCIDAD VARIABLE	52
5.6 RESULTADOS PRUEBAS	53
5.6.1 Herramienta en Excel para análisis técnico - económico.....	53
5.6.2 Características y análisis de la potencia y eficiencia de cada componente del sistema de bombeo a velocidad constante.	54
5.6.3 Características y análisis de la potencia y eficiencia de cada componente del sistema de bombeo a velocidad variable.	95
5.6.4 Balance de potencia de los sistemas de bombeo a máxima eficiencia.....	112
5.6.5 Costos de energía año a velocidad variable.	115
5.6.6 Ahorro de energía.	116
5.6.7 Proyecto de eficiencia energética.	119
5.7 FORMA RESUMIDA - MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE USO DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE BOMBEO	126
5.8 DESCRIPCION DE LA HERRAMIENTA EN EXCEL.....	127
5.8.1 Pasos de la Herramienta en Excel a velocidad constante.....	128
5.8.2 Pasos de la Herramienta en Excel a velocidad variable.....	135
5.8.3 Determinación ahorro de energía y proyecto de eficiencia energética	140

5.8.4 Proyecto de eficiencia energética.	144
6 APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA EN EXCEL EN EL CASO DE UNA TESIS SOBRE UN SISTEMA DE BOMBEO EN INGENIO AZUCARERO.	148
7 CONCLUSIONES	155
8 RECOMENDACIONES.....	159
BIBLIOGRAFIA.....	160
ANEXOS	
ANEXO A – Marco Teórico –Archivo en Word.	
ANEXO B – Cuadros en Excel mediciones sistema bombeo a velocidad constate.	
ANEXO C - Cuadros en Excel mediciones sistema bombeo a velocidad variable.	
ANEXO D - Registros mediciones por analizador de redes a velocidad constante.	
ANEXO E - Registros mediciones por analizador de redes a velocidad variable.	
ANEXO F - Herramienta Excel a velocidad constante	
ANEXO G - Herramienta Excel a velocidad variable	
ANEXO H - Herramienta Excel ahorro de energía, Proyecto ahorro energético	
ANEXO I - Cuadro en Excel relaciones entre componentes sistemas de bombeo	
ANEXO J - Aplicación de la herramienta en Excel a un caso de un ingenio	

CONTENIDO DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Componentes del Sistema de bombeo a) Sin variador de velocidad, b) Con variador de velocidad	24
Figura 2. Banco de prueba para sistema de bombeo – pasos acople motor	25
Figura 3. Banco de pruebas con instrumentación y conexionado para las pruebas	26
Figura 4. Procedimiento, cálculos, mediciones, características sistema de bombeo	28
Figura 5. Modelo para optimización de energía en sistemas de bombeo	37
Figura 6. Diagrama de Moody.....	47
Figura 7. Montaje y mediciones del sistema de bombeo a velocidad constante.	51
Figura 8. Montaje y mediciones del sistema de bombeo a velocidad variable (con variador de velocidad).....	52
Figura 9. Característica Caudal Q de la bomba Vs velocidad n	55
Figura 10. Tramos definidos de tubería del circuito de carga para calcular y determinar la característica de carga del sistema.....	56
Figura 11. Característica de carga del sistema hidráulico del banco de prueba...	61
Figura 12. Característica de carga de la bomba del banco de prueba.....	63
Figura 13. Características de carga de bomba y carga de sistema Vs Caudal Q	64
Figura 14. Característica de potencia útil P_u Vs caudal Q	65
Figura 15. Sistema extensor de estator construido para medir par motor mediante brazo torsor y balanza.	67
Figura 16. Característica de potencia en el eje (al freno) Vs. Caudal Q	69
Figura 17. . Característica de eficiencia de la bomba Vs caudal.....	70
Figura 18. Características de carga bomba, carga sistema, potencia útil bomba, potencia en el eje bomba o potencia al freno y eficiencia bomba – comparativo .	70
Figura 19. Característica de eficiencia de la bomba ajustada en Excel	70
Figura 20, Acople flexible tipo araña.....	72
Figura 21. Acople flexible de cruceta (o tipo araña).....	72
Figura 22. Eficiencias de un sistema de bombeo convencional Vs. de alta eficiencia.....	75

Figura 23. Conexión motor banco de prueba y medidas resistencias devanados.	76
Figura 24. Curvas eficiencia motor por medición directa y separación pérdidas ...	84
Figura 25. Comportamiento de la característica de eficiencia en motores pequeños como función de la relación del par de carga respecto al par nominal	86
Figura 26. Curva Eficiencia del arrancador en función del Caudal Q.....	88
Figura 27. Medidas de resistencia de conductores y shunt a velocidad constante	89
Figura 28. Características de eficiencia sistema de bombeo a velocidad constante	91
Figura 29. Desplazamiento de la característica de la bomba sobre la curva de carga del sistema al variar la velocidad de la bomba.....	96
Figura 30. Curva de Potencia útil de la bomba Vs Caudal Q/Frecuencia Hz.	97
Figura 31. Curva de Potencia en el eje Vs. caudal.....	98
Figura 32. Curva de par motor Vs velocidad.....	99
Figura 33. Curva de par motor Vs velocidad.....	99
Figura 34. Curva de eficiencia de la bomba a velocidad variable en función del caudal Q y de la Frecuencia.....	100
Figura 35. Señal de tensión a la salida del variador de velocidad.....	105
Figura 36. Característica de Eficiencia conjunto Variador de velocidad - motor en función del caudal Q y de la frecuencia.....	106
Figura 37. Característica de eficiencia del arrancador en función del caudal con variación de velocidad por frecuencia.....	108
Figura 38. Valores de resistencias medidas de los conductores utilizados en las conexiones para las pruebas a velocidad variable.....	108
Figura 39. Característica de Eficiencia de todo el sistema de bombeo.....	110
Figura 40. Características de las eficiencias del sistema de bobeo, de todos los componentes y la total	110
Figura 41. Eficiencias totales del sistema de bombeo a velocidad constante y a velocidad variable.	111
Figura 42. Características de bomba, carga del sistema, potencia total consumida con y sin variador y eficiencia total sistema	112

Figura 43. Diagrama de Sankey del sistema de bombeo en el punto de máxima eficiencia a velocidad constante	113
Figura 44. Diagrama de Sankey del sistema de bombeo en el punto de máxima eficiencia a velocidad constante	114
Figura 45. Curva VPN Vs. Tasa para la evaluación financiera del proyecto	124
Figura 46. Curva de carga del sistema bomba de inyección – azúcar refinada ..	149
Figura 47. Curva de carga sistema inyección obtenido con la herramienta en Excel	150
Figura 48. Curva de carga bomba y carga del sistema obtenido con la herramienta en Excel	150
Figura 49. Grafica con curvas de carga bomba, carga sistema, potencia en el eje y útil de la bomba y eficiencia de la bomba, obtenida con la herramienta en Excel	152
Figura 50. Características de potencia sistema de bombeo inyección azúcar....	153
Figura 51. Características de eficiencia de componentes y sistema de bombeo inyección de azúcar	154

CONTENIDO DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Coeficiente de pérdidas ξ para válvulas, codos y Tés.....	48
Tabla 2. Tabla de la herramienta en Excel para construir las características de carga del sistema y carga de la bomba a velocidad constante.....	60
Tabla 3. Características acoples flexibles tipo araña.....	76
Tabla 4. Eficiencias motores de inducción clasificación B de acuerdo a NEMA .	85
Tabla 5. Tabla para hallar el costo de energía a velocidad constante.....	95
Tabla 6. Balance de potencia del sistema de bombeo en punto de máxima eficiencia a velocidad constante	113
Tabla 7. Balance de potencia del sistema de bombeo en punto de máxima eficiencia a velocidad constante	114
Tabla 8. Tabla para hallar el costo y ahorro de energía a velocidad variable	115
Tabla 9. Cuadro con el promedio de ahorro año visto a 10 años	116
Tabla 10. Tabla en Excel para calcular el costo y ahorro de energía entre velocidad variable y constante	117
Tabla 11. Cuadro con el promedio de ahorro año visto a 10 años con tiempos de caudal de mayor eficiencia	118
Tabla 12. Cuadro de la herramienta en Excel, para la formulación del proyecto de eficiencia energética	120
Tabla 13. Cuadro de la herramienta en Excel para el flujo de fondos del proyecto de eficiencia energética	121
Tabla 14. Cuadro de la herramienta en Excel para la evaluación financiera del proyecto de eficiencia energética.....	123
Tabla 15. Tabla con parámetros de caudal y carga de proyecto ingenio.....	150
Tabla 16. Cuadros de Pérdidas y eficiencias de conductores, motor, bomba sistema de bombeo inyección azúcar refinada	151
Tabla 17. Pérdidas de energía sistema electromecánico bombeo inyección azúcar	153

INTRODUCCION

El presente proyecto tiene un importante nivel de integralidad lo cual motiva bastante su estudio, y puede contribuir en forma importante en lo industrial y en lo académico, ya que involucra, además de la parte de investigación, un componente de profundización que demanda el manejo de las competencias correspondientes, entre otros, diseño y construcción mecánica, montaje electromecánico, pruebas, análisis de resultados, diseño y manejo de la herramienta en Excel y formulación y evaluación de proyectos. .

Este proyecto toma como referente la gran utilización de los sistemas de bombeo en procesos industriales para la conducción de fluidos, principalmente agua, debido a que son de los mayores consumidores y de los que más pérdidas presentan, por lo que se convierte en una necesidad aumentar su eficiencia.

El sistema de bombeo convencional está conformado por la carga hidráulica, la bomba centrífuga horizontal, el motor trifásico de inducción tipo jaula de ardilla, el acople motor – bomba, variador de velocidad AFD (Frequency adjustable device) para el motor (opcional) y el Centro de Control de Motores (CCM) o en su defecto el arrancador, en la alimentación del sistema [30].

Actualmente va en aumento el empleo de motores de alta eficiencia y se hacen ingentes esfuerzos en muchos países del mundo por lograr ahorro de energía, no solo por lo que significa disminuir el costo de generación para el país y el costo asumido por el usuario, sino que hay una relación directa con el impacto medioambiental que se produce por la generación, y en estos esfuerzos se implementan muchos proyectos de eficiencia energética.

Este proyecto representa una oportunidad importante para contribuir con el propósito de ahorro energético, mediante la definición de un modelo para el

estudio energético del sistema de bombeo completo desde la carga hasta el CCM o arrancador, que pocas veces se ha estudiado en conjunto.

Para revisar el marco conceptual de todos los elementos del sistema de bombeo, el proyecto presenta en el anexo A el marco teórico, en éste se analiza el sistema desde la carga hidráulica hasta la fuente por partes y como un todo, para varios caudales, tanto a velocidad constante como a velocidad variable mediante el variador de velocidad por frecuencia, con el propósito de hacer un diagnóstico de la contribución de cada una de las partes en la eficiencia de todo el sistema y a su vez encontrar el punto de operación o sector en el cual el sistema puede trabajar a la más alta eficiencia. En el mismo anexo, se estudia como lograr el ahorro de energía con el uso del variador de velocidad AFD y como formular el respectivo proyecto energético de implementación del mismo y su correspondiente análisis de viabilidad.

En el informe final del proyecto se presenta el desarrollo del mismo, en la parte práctica, la definición del procedimiento que permite armar el modelo o secuencia de pasos a seguir, tanto a velocidad constante como a velocidad variable, para lograr obtener el punto de mayor eficiencia del sistema de bombeo. Siguiendo el modelo se indica cómo se logra hacer los montajes y pruebas requeridos, con las mediciones correspondientes.

En el informe se indica como junto con la información de las pruebas, la secuencia de pasos del modelo y la herramienta o aplicativo diseñado en Excel, se van construyendo las tablas y graficas del comportamiento energético del sistema y cada uno de sus componentes. Se van obteniendo resultados y con su análisis se va generando el diagnostico energético del sistema de bombeo. Terminado éste, se determina el ahorro energético logrado mediante el uso del variador de velocidad AFD, se formula el proyecto energético de implementación del AFD y se realiza su respectivo estudio de viabilidad. La herramienta en Excel se presenta

en Anexos, en el anexo F para velocidad constante, en el anexo G para velocidad variable y el proyecto energético con su estudio de viabilidad en el anexo H

Posteriormente con el objeto de verificación, se presenta en forma resumida y gráfica el modelo desarrollado, igualmente se dedica un ítem para hacer una descripción completa de la herramienta o aplicativo en Excel. De otra parte en el anexo I se muestran dos cuadros con las relaciones entre los elementos del sistema de bombeo uno para velocidad constante y el otro para velocidad variable. Luego, con el ánimo de validación, en el anexo J se presenta la aplicación de la herramienta en Excel, en un caso de un ingenio, relacionado con un sistema de bombeo estudiado en una tesis, en el informe final se describe brevemente esta aplicación. Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones y bibliografía utilizada.

En el Anexo B se muestran los cuadros de resultados de las pruebas a velocidad constante, y en el anexo C los mismos, pero a velocidad variable. En el anexo D se muestran los registros de los analizadores de red a velocidad constante con las conversiones a Excel y en el Anexo E, lo propio a velocidad variable.

1 TITULO

Modelo de optimización de uso de energía en sistemas de bombeo

2 DEFINICION DEL PROBLEMA

El ahorrar energía hoy debe ser un propósito de todo ser humano que puede contribuir a que los recursos naturales duren algo más y el medio ambiente tenga las condiciones para que los seres vivos puedan mantenerse sobre la faz de la tierra. Es mandatorio incrementar la eficiencia energética en las actividades y procesos en los que el hombre interviene.

En [41] se describe que en 1973 a nivel mundial, el consumo de energía eléctrica en el sector industrial fue el 53% de toda la energía eléctrica generada y en 2010 fue el 41,5%. Es claro el crecimiento de la actividad industrial, este descenso en el consumo se debe, entre otros, al incremento en el empleo de los motores de alta eficiencia y los planes de ahorro de energía eléctrica que gran parte de los países del mundo realizan. Sin embargo en este sector industrial los sistemas de bombeo para transportar fluidos de los procesos, son de los mayores consumidores y de los que más pérdidas presentan, por lo cual representa una oportunidad muy importante contribuir en aumentar su eficiencia.

El sistema de bombeo convencional está conformado por la carga hidráulica, la bomba, el motor de inducción, el acople motor - bomba, variador de velocidad para el motor (opcional) y el Centro de Control de Motores (CCM) o arrancador en la alimentación del sistema.

Aunque se ha trabajado mucho en cuanto a metodologías de diseño, selección y mantenimiento de cada una de las partes del sistema de bombeo por separado ([15], [22], [24], [32], [33]), tanto de motores convencionales como de alta eficiencia, bombas para que trabajen eficientemente, conjunto motor-bomba, el conjunto motor-variador de velocidad o el conjunto bomba - motor-variador de velocidad, es poco lo que se ha trabajado a nivel de un modelo para el estudio energético del todo el sistema de bombeo, desde la carga hasta el MCC en la

alimentación, la influencia de cada uno de los elementos entre si y sobre la eficiencia de todo el sistema como el trabajo realizado por el grupo conformado por European Copper Institute (ECI), Fraunhofer – ISI, Ku Leuven y University of Coimbra (U.C) [30]

Se hace necesario un modelo para el estudio o diagnóstico de todo el sistema de bombeo tanto convencional como con variador de velocidad, que permita hallar en cada caso para todo el sistema y cada una de sus partes, las eficiencias y respectivas potencias y el punto o sector de operación de mayor eficiencia.

Este diagnóstico permitirá definir las modificaciones necesarias para lograr una mayor eficiencia y dentro de estas, la contribución que presenta el variador de velocidad en estos sistemas debido a la característica de carga cuadrática que presentan los fluidos cuando son movidos por las bombas centrífugas.

El aumentar la eficiencia a los sistemas de bombeo de los procesos de producción de una industria, constituye todo un proyecto de eficiencia energética que impacta directamente a los costos y por tanto a la productividad. Como la energía a nivel producción es un costo variable, al disminuir la energía disminuyen los costos variables por unidad producida y por tanto disminuye el costo total unitario, por lo cual aumenta la productividad unitaria y por esto la productividad del proceso.

Visto desde el indicador de Pérdidas y Ganancias P&G, al disminuir los costos variables se obtiene una mayor contribución marginal, lo cual permite o transferir ese ahorro al precio de venta de un producto y obtener la misma utilidad pero ser más competitivo u obtener mayor utilidad que puede ser reinvertida o darle mayor liquidez al negocio

3 JUSTIFICACION

Este proyecto tiene varios beneficios entre los cuales sobresalen:

- Coadyuvar con el ahorro de energía, tanto para las empresas generadoras como para los usuarios, lo cual trae unos beneficios adicionales, menor impacto al medio ambiente, mayor competitividad de las empresas consumidoras porque sus costos unitarios pueden bajar lo correspondiente al ahorro de energía por unidad producida.
- Es este aspecto de ahorro de energía, se contribuye con mayor visibilidad a los beneficios de utilizar sistemas de bombeo que trabajen a alta eficiencia o que incorporen variador de velocidad por frecuencia. Se han demorado en establecerse y desarrollarse las políticas energéticas en nuestros países latinoamericanos tanto por no comprender claramente la relación entre la eficiencia y los costos totales durante la vida útil de los equipos, también porque los compradores se concentran con frecuencia en el bajo costo inicial de los equipos y no se tiene suficientemente claro que un riguroso dimensionamiento y selección de los componentes, vista una mayor eficiencia, aunque pueden ser más costosos inicialmente, gracias a los costos de operación más bajos, compensan la diferencia en un plazo normalmente apropiado.
- A nivel ambiental se puede contribuir a disminuir la correspondiente generación de CO_2 por la no generación de la energía ahorrada. A nivel industrial los costos operacionales pueden disminuir, ya que las frecuencias de intervención en mantenimiento para motores y bombas principalmente por trabajar con alta eficiencia pueden ser más distantes, o cuando trabajan con variador de velocidad por frecuencia, la cavitación es menor, ya que los arranques y paradas de bombas son más amortiguados y los caudales están mejor controlados por la velocidad comandada por el variador.

Utilizando los motores de inducción adecuados para aplicaciones con variadores de velocidad, el desgaste de equipos es menor, por lo cual las necesidades de mantenimiento disminuyen y las frecuencias de mantenimiento preventivo se reducen , por tanto el tiempo medio entre fallas (TMBF) aumenta , por lo cual la confiabilidad de los equipos igualmente se mejora. Todo esto se podrá revertir en menores costo unitarios de producción, con los efectos positivos ya mencionados,

- También contribuye con la academia en los procesos de enseñanza, por esto mismo es importante la cantidad de información que maneja el proyecto, así como el grado de descripción presentado. De igual manera se contribuye con el sector industrial para el diagnóstico de sus sistemas

- A nivel tecnología, se consideran en el proyecto los motores convencionales y los motores de alta eficiencia, así como los demás equipos con sus características entregadas por fabricantes comercialmente , más no se entra en el tema de modificaciones de materiales ya que ese tema corresponde a otro objetivo para otro proyecto diferente al presente.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo para diagnosticar los componentes del sistema de bombeo: carga, bomba centrífuga horizontal, acople motor bomba, motor eléctrico de inducción jaula de ardilla convencional, variador de velocidad y Centro de Control de Motores (CCM) o arrancador para que trabaje el conjunto en alta eficiencia energética.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Mediante el banco de prueba para fluidos, adaptado para este proyecto, conformado por una pequeña red hidráulica, bomba centrífuga pequeña marca Surtidor modelo AS – 75 de $\frac{3}{4}$ " x $\frac{3}{4}$ ", motor de inducción trifásico tipo Jaula de ardilla de 1.2 hp , acople rígido motor – bomba, variador de velocidad por frecuencia y arrancador directo, se pretende Identificar y determinar las características del sistema de bombeo: carga hidráulica, bomba centrífuga, motor de inducción trifásico jaula de ardilla, acople motor bomba, variador de velocidad y arrancador, para que opere en alta eficiencia energética.
- Identificar las relaciones tanto funcionales como incidentales de los componentes del sistema de bombeo: carga hidráulica, bomba centrífuga, motor de inducción trifásico jaula de ardilla, acople motor bomba, variador de velocidad y Centro de Control de Motores (CCM) o arrancador, tomando como uno de los referentes las leyes de semejanza de las bombas.
- Construir una herramienta en Excel que permita hacer el diagnóstico y determinar el punto o sector para que el sistema opere en alta eficiencia energética, así mismo permita realizar el análisis técnico económico que de

soporte a la propuesta, mediante la evaluación de viabilidad por el método de VPN y TIR ya que esta herramienta facilita su estudio.

- Verificar la aplicación de la herramienta computacional mediante casos de estudio, para lo cual se tiene propuesto considerar el caso de la tesis de un ingenio azucarero sobre el sistema motor bomba y sistema hidráulico, con los resultados obtenidos, en los cuales se ha medido en campo parámetros de operación.

5 DESARROLLO

Teniendo claro el funcionamiento del sistema de bombeo y de cada una de sus partes, como el presente es un proyecto que implica la utilización de equipos, pruebas, análisis de resultados y demás, inicialmente se hace el alistamiento y adaptación de los equipos a utilizar, etapa que es dispendiosa por el componente mecánico, ya que se deben fabricar algunas piezas para el montaje, principalmente del motor.

Luego se construye un cuadro con todo el procedimiento a seguir que permite definir el modelo o secuencia de pasos a implementar. Esta es la herramienta más importante del proyecto porque permite lograr el objetivo general. Este modelo o secuencia de pasos, define las pruebas a realizar, para las que se ha adaptado un banco de pruebas para bombas centrífugas del Laboratorio de Fluidos de la Universidad Autónoma de Occidente.

El banco de pruebas está conformado originalmente por una red hidráulica, una bomba centrífuga, un motor de Corriente Continua de 1 KW de potencia para 3000 r.p.m. con un variador de velocidad D.C por campo. Para este proyecto se ha tenido que cambiar el motor de corriente continua por un motor de corriente alterna de inducción, y ha sido necesario diseñar, fabricar e implementar una adaptación mecánica especial para poderlo acoplar a la bomba. Se utiliza el mismo acople motor bomba que trae originalmente el banco y se le cambia la araña interna de caucho manteniendo la referencia original. Por ser un motor tan pequeño no se ha utilizado un Centro de Control de Motores CCM, sino un arrancador directo; para el caso de los otros tipos de arranque existentes a nivel industrial, el análisis es diferente y no se incluye en el alcance de este proyecto.

Para facilidad del estudio y diagnóstico del sistema de bombeo, se ha construido una herramienta práctica en Excel, que se alimenta manualmente con las

características y especificaciones de las partes que conforman el sistema de carga hidráulico, y los resultados de las pruebas que se realizan en el sistema a velocidad constante y a velocidad variable. La herramienta permite mostrar mediante tablas de datos el comportamiento energético en cada componente y en el sistema completo con sus curvas características de potencias y eficiencias y el punto o sector donde se obtiene la mayor eficiencia del sistema. De su análisis se puede hacer diagnóstico sobre las modificaciones a sugerir para lograr una mayor eficiencia. Con los resultados anteriores se halla el ahorro de energía y, se construye el respectivo proyecto energético con su estudio de viabilidad.

La herramienta en Excel a velocidad constante se presenta en el anexo F, para velocidad variable en el anexo G y para el proyecto energético en el anexo H. En el anexo I se muestran dos cuadros con las relaciones funcionales energéticas entre componentes tanto a velocidad constante como a velocidad variable. Para fines prácticos y de funcionalidad, la descripción de los procesos desarrollados con las herramientas, se van referenciado sobre la herramienta misma en Excel en los anexos respectivos, de tal manera que el lector se remita a éstos en cada caso referido.

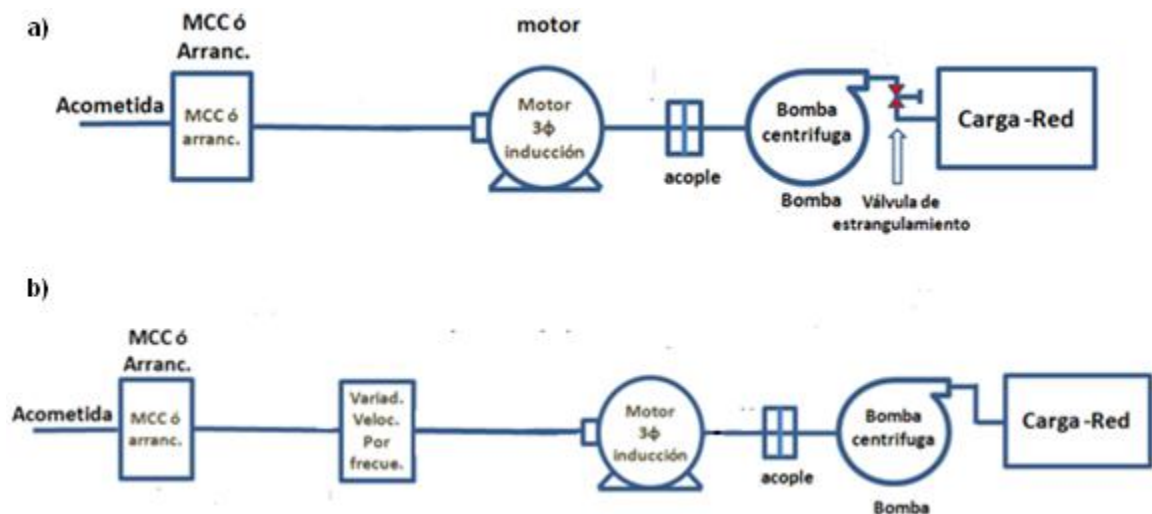
Complementariamente hacia el final del informe y para efectos de verificación, se resume el modelo desarrollado en forma gráfica con funciones e indicadores por cada etapa. De forma similar, se dedica un ítem para hacer la descripción funcional de la herramienta a velocidad constante y a velocidad variable, también remitiéndose a la herramienta en Excel directamente en cada caso referido.

Luego, con el ánimo de validación de la herramienta en Excel, en el anexo J se presenta la aplicación en un caso de un ingenio azucarero relacionado con un sistema de bombeo estudiado en una tesis, se describe brevemente esta aplicación refiriéndose directamente al anexo J. Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones y bibliografía utilizada.

5.1 SISTEMA DE BOMBEO Y BANCO DE PRUEBA

Los sistemas de bombeo que transportan un fluido, generalmente agua, de un sitio a otro, como ya se ha indicado, están conformados por la red de carga del sistema, la bomba centrífuga, el acople motor bomba, el motor de inducción trifásico, el variador de velocidad por frecuencia o AFD, que es opcional y el CCM o arrancador,, como se observa en la figura 1, donde se muestra el sistema en la parte a) sin variador de velocidad y en la parte b) con variador de velocidad.

Figura 1. Componentes del Sistema de bombeo a) Sin variador de velocidad, b) Con variador de velocidad



Fuente: El autor

La mayoría de procesos son de flujo variable, la variación del flujo se hace de diferentes formas, por válvula de estrangulamiento en la descarga de la bomba, ver esquema a) de la figura 1, otra forma es con el AFD variando la velocidad de la bomba, como se indica en b) de la misma figura, siendo el primer método más costoso que el segundo por el desperdicio de energía en el proceso de estrangulamiento, razón por la cual este proyecto va a demostrar la conveniencia

de utilizar el segundo método. los ahorros logrados, como conocer el punto o sector donde el sistema puede trabajar a la eficiencia más alta y el proyecto de implementación del AFD con su estudio de viabilidad.

Figura 2. Banco de prueba para sistema de bombeo – pasos acople motor



Fuente: El autor

Se requiere hacer el estudio desde la carga, aguas arriba, hacia la acometida, analizando los procesos de transformación y el balance energético del sistema.

Para las pruebas, se ha adaptado un pequeño banco de pruebas de bomba centrífuga. Para acoplarle el motor trifásico de inducción fue necesario diseñar y construir el acople y el sistema extensor para medición de par. En la figura 2 se muestran varias fotos del banco de prueba y del proceso de acople del motor.

En la figura 3 se muestran los diversos instrumentos de medición y conexionado para las pruebas.

Figura 3. Banco de pruebas con instrumentación y conexionado para las pruebas



Fuente: El autor

Los equipos e instrumentación utilizados se relacionan a continuación:

Carga del sistema – Red hidráulica en tubería galvanizada de $\frac{3}{4}$ " incluye rotámetro para 8 GPM, accesorios todos en $\frac{3}{4}$ ", manómetros y vacuómetro.

Bomba centrífuga marca Surtidor Modelo AS -75 de $\frac{3}{4}$ " x $\frac{3}{4}$ "

Motor trifásico de inducción jaula de ardilla, Siemens 1,2 hp 220/440, Volts., 3400 rpm con Sistema de brazo solidario a estator para medición de par,

Acople flexible motor-bomba tipo araña o cruceta referencia L75

Variador de velocidad por frecuencia, Siemens Micromaster 420

Balanza Gramera marca OHAUS capacidad 1000 g. d=2g

Arrancador Siemens 3VE 1000 ZI 16 amperios

Equipo de medición compuesto por:

2 analizadores de red trifásicos HT Instruments

PQA824, osciloscopio digital UNI – T UTD2102CEL

Mili ohmímetro digital Extech

Pinza digital voltiamperimétrica Clamp Meter 640D.

Resistencias variables/shunt 0-10 Ω 3,16 A,

Variac trifásico 208V 240 V 10 Amp, 4,8 KVA,

Termómetro digital Fluke 51,

Tacómetro óptico digital SPI,

Termo higrómetro Cole Palmer

5.2 PROCEDIMIENTO, CALCULOS Y MEDICIONES

Teniendo en cuenta el marco teórico presentado en el anexo A, se ha construido un cuadro con el procedimiento de cálculos, mediciones y determinación de las características del sistema de bombeo para realizar el análisis energético del sistema de bombeo por componente y completo tanto a velocidad constante como variable, el cual se muestra en la figura 4. Este es la base para definir el modelo o secuencia de pasos para el análisis energético del sistema de bombeo

Figura 4. Procedimiento, cálculos, mediciones, características sistema de bombeo

Actividad	Operación	Observación
Determinar característica Caudal Q Vs velocidad n	$Q = f(n)$	Construir tabla de datos de caudal Q como función de la velocidad n de la bomba. Construir característica. Muestra como el caudal varía con la velocidad Q = caudal (gpm) n = velocidad medida en el eje de la bomba = velocidad del motor variando Driver o AFD
Determinar característica de carga del sistema	$H_b = H_{estática} + H_{dinámica}$ $H_b = J + KQ^2$	H_b = Carga del sistema $H_{estática} = J$ = Carga estática (m) $H_{dinámica} = KQ^2$ = Carga dinámica (m)
	Para hallar $H_{estática} = J$ Forma simplificada $J = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + Z_2 - Z_1$ * Forma larga $J = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1$ $Q = A * v_{lineal}$ $v_{lineal} = \frac{Q}{A}$ $A = \pi \frac{D^2}{4}$	P_2 = Presión 2 red descarga - medida (manom.) (m) P_1 = Presión 1 red succión - medida (vacuom.) (m) Z_2 = Altura 2 descarga resp. centro bomba (m) Z_1 = Altura 1 succión resp. centro bomba (m) γ = Peso específico (N/m^3) v_1 = Velocidad lineal del fluido en el punto 1 v_2 = Velocidad lineal del fluido en el punto 2 A = Área transversal interna tubería por donde pasa Q D = Diámetro interno tubería por donde pasa Q
	Para $H_{dinámica} = KQ^2$ se puede hacer de varias formas: 1) * $k = H_{superf} + H_{accesorios}$ $k = \left(\sum_1^2 \lambda \frac{lv^2}{D2g} + \sum_1^2 \xi \frac{v^2}{2g} \right)$ $R_E = \frac{v * D * \rho}{\mu}$ 2) $k = \frac{1}{2gA^2} \left(\sum_1^2 \lambda \frac{l}{D} + \sum_1^2 \xi \right)$ $R_E = \frac{v * D * \rho}{\mu}$	g = fuerza de la gravedad $\frac{m}{s^2}$ A = Área = $\pi \frac{D^2}{4}$, D = diámetro interno (m^2) λ = Factor pérdidas por fricción tubería recta, hallar R_E l = Longitud de tramo recto de tubería de diámetro D R_E = Número de Reynolds (-) v = velocidad lineal del fluido ($\frac{m}{s}$) D = diámetro interno tubo por donde pasa el fluido (m) ρ = Densidad del fluido (Kg/m^3) μ = viscosidad del fluido $R_E < 2300 \rightarrow$ flujo laminar $\rightarrow \lambda = \frac{64}{R_E}$ $R_E > 4000 \rightarrow$ flujo turbulento \rightarrow Hallar λ por diag. Moody ξ = Factor pérdidas por accesorios \rightarrow Hallar por tabla de acuerdo al tipo de accesorio
	El fabricante suministra la característica de diseño de la bomba	Mediante pruebas, se debe encontrar la altura manométrica de la bomba, tomando lectura de la presión

<p>Determinar característica de carga de la bomba</p> <p>H_{manom} Vs. Q</p>	<p>o se determina mediante pruebas</p> <p>Ecuación de la curva:</p> $H = a - cQ^2$ $a =$ $\frac{P_{manom\ salida} + P_{vacuom\ entrada}}{\rho g Q}$ <p>Tomar lectura de un punto de operación (H_{operc}, Q_{operc})</p> $c = \frac{a - H_{op}}{Q_{op}^2}$ <p>Se varía Q, se halla la tabla $H = f(Q)$ y se representa la característica</p>	<p>del manómetro en la descarga a la salida de la bomba y la presión del vacuómetro en la succión en la entrada de la bomba, así se suman y la resultante será la altura manométrica de la bomba a su respectivo caudal variando este caudal con la válvula de salida y manteniendo constante la velocidad de la bomba</p> <p>Otra forma es, mediante la lectura del manómetro y vacuómetro a la salida y entrada respectivamente de la bomba, hallar la presión estática o manométrica (sin caudal), este será el valor de a en la ecuación de la característica de la bomba $H = a + cQ^2$, luego con el mismo manómetro y vacuómetro se toma un punto de operación, manteniendo la velocidad constante H_{operc}, Q_{operc}, donde $\frac{H_{operc}}{Q_{operc}^2} = c$ que es el coeficiente de Q^2, se halla la tabla y se traza la característica respectiva</p>
<p>Calcular la potencia útil de la bomba</p> <p>P_{util} a diferentes caudales a</p> <p>a) Velocidad constante y</p> <p>b) Velocidad variable</p>	$P_{util} = \gamma Q H_b \quad [W]$ <p style="text-align: center;">*</p>	<p>Hay varias formas para determinar la potencia útil, dependiendo de las unidades utilizadas.</p> <p>P_{util} = Potencia útil ó Potencia hidráulica (W)</p> <p>γ = Peso específico (N/m^3) – calculado</p> <p>Q = Caudal de la bomba (m^3/seg) – medido</p> <p>H_b = Altura/cabeza alcanzada por bomba (m) - calculada</p>
	$P_{util} = \frac{\rho g Q H_b}{1000} \quad [KW]$	<p>P_{util} = Potencia útil ó Potencia hidráulica (KW)</p> <p>Q = Caudal útil (m^3/seg) - medido</p> <p>H_b = Altura útil o cabeza (m) - calculada</p> <p>ρ = Densidad del fluido en (Kg/m^3) - conocida</p> <p>g = Aceleración de la gravedad (m/seg^2) - conocida</p>
	$P_{util} = HHP = \frac{SGQH_b}{3960} \quad [hp]$	<p>$P_{util} = HHP$ = Potencia útil ó Potencia hidráulica (hp)</p> <p>Q = Caudal útil (gpm) - medido</p> <p>H_b = Altura útil o cabeza (ft) – Calculada</p> <p>SG = Gravedad específica = 1 - conocido</p>
<p>Determinar características</p> <p>P_{util} Vs Q a</p> <p>a) velocidad cte.</p> <p>b) veloc. variable</p>		<p>Realizar las tablas respectivas a velocidad constante y velocidad variable y trazar las características respectivas</p>

<p>Calcular la potencia al freno - eje de la bomba Peje a</p> <p>a) Velocidad constante y</p> <p>b) Velocidad variable</p>	<p>Peje = 0,1047nM [W]</p> $Peje = \frac{T * n * 746}{1000 * 726} [W]$ <p>Peje = BHP = $\frac{QH_b SG}{3960 * \eta_b}$ [hp]</p>	<p>Tomando mediciones en el eje de la bomba, facilita determinar luego la eficiencia de la bomba η_b</p> <p>Peje = Potencia al freno ó potencia en el eje (W)</p> <p>n = Velocidad eje bomba (rpm) - medido</p> <p>M = Par eje bomba = Par motor (N * m) – medido</p> <p>Para la segunda fórmula:</p> <p>n = Velocidad eje bomba (rpm) - medido</p> <p>T = Par eje bomba = Par motor (Grms-m) – medido</p> <p>Se utiliza si se conoce la eficiencia de la bomba:</p> <p>BHP = Potencia al freno ó potencia en el eje (hp)</p> <p>Q = Caudal útil (gpm)- medido</p> <p>H_b = Altura útil o cabeza (ft) - calculada</p> <p>SG = Gravedad específica (1) - conocido</p> <p>η_b = Eficiencia de la bomba - conocida</p>
<p>Determinar características Peje Vs Q a</p> <p>a) velocidad cte.</p> <p>b) veloc. variable</p>		<p>Realizar las tablas respectivas a velocidad constante y velocidad variable y trazar las características respectivas</p>
<p>Calcular eficienc. bomba para cada caudal y determinar características η_b Vs Q a</p> <p>a) velocidad cte.</p> <p>b) veloc. variable</p>	$\eta_b = \frac{P_{util}}{P_{eje}} * 100 \quad [\%]$	<p>η_b = Eficiencia de la bomba (%)</p> <p>P_{util} = Potencia útil ó Potencia hidráulica (W)</p> <p>Peje = Potencia al freno ó potencia en el eje (W)</p>
<p>Determinar el rango y punto de mayor eficiencia en función del caudal para</p> <p>a) velocidad cte.</p> <p>b) veloc. variable</p>		<p>Con base en las características construidas de Eficiencia Vs caudal para velocidad constante y velocidad variable determinar el rango y punto de mayor eficiencia – el punto y los rangos de caudales a los cuales se presenta la mayor eficiencia</p> <p>Cruzar esta información con la curva de demanda año – mayores caudales demandados por el sistema año, Determinar variaciones tanto en eficiencia como en caudales de valores máximos Vs. Reales tanto para velocidad constante como para velocidad variable..</p>
<p>Determinar requerimiento de Potencia del</p>		<p>Conociendo la potencia en el eje que es la potencia entregada a la bomba y que ha sido medida directamente en el eje de la máquina en función del par y la velocidad para cada caudal tanto a velocidad constante como a</p>

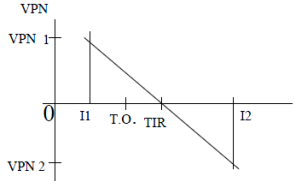
<p>motor en función del caudal Q para</p> <p>a) velocidad cte.</p> <p>b) veloc. variable</p>		<p>velocidad variable, se toma la potencia correspondiente al mayor valor en función del caudal para ambas condiciones, se divide por la eficiencia del acople y se verifica que esté en el punto o sector de máxima eficiencia del motor, se toma un factor de servicio que puede ser del 10%, con lo cual queda determinada la potencia del motor. Se debe tener en cuenta cuando se va a utilizar variador de frecuencia que el motor tenga una capacidad del 100% entre las frecuencias de 50 a 65 Hz. Para el caso de motores diseñados para 60Hz.</p> <p>Para el caso del montaje presente el motor está sobredimensionado ya que se utilizó un motor disponible y no seleccionado previamente.</p>
<p>Determinar la eficiencia del acople motor bomba</p>	$T_{(N-m)} = \frac{Pot_{mot}(KW) * 1,8 * 100}{rpm}$ <p style="text-align: center;">Ó</p> $T = \frac{5252 * hp}{rpm} = [Lb - pie]$ <p>Cumpliendo que:</p> $T_{cat} \geq T$	<p>Se calcula el torque del acoplamiento de acuerdo al motor utilizado con un factor de seguridad. Luego se busca el acople comercial que aplique por exceso. Para el montaje realizado tomando lo anterior y lo presentado por [30], se define la eficiencia del acople en 98%, este acople es elástico y tiene muchas características del rígido y presenta mayor eficiencia que los elásticos</p> <p>T = Torque al cual estará sometido el acople,</p> <p>Pot_{mot} = Potencia motor en KW.</p> <p>1,8 = factor de seguridad o de servicio, es un valor promedio para 24 horas de trabajo</p> <p>rpm = velocidad del motor</p> <p>100 = valor constante de referencia de velocidad a nivel de cálculos</p> <p>$N-m$ = unidades del Par torsor calculado</p> <p>T_{cat} = Momento del acople que aparece en los catálogos</p> <p>T = Momento del acoplamiento, que es el calculado</p>

<p>Determinar la eficiencia del motor a</p> <p>a) velocidad cte.</p> <p>b) veloc. variable</p>	$P_{cue} = 3 * R_f * I_f^2$ $P_{fe} + P_{fw} = (3,5 - 4,2\%)P_i$ $P_{LL} = (K\%)P_n$ $P_{cur} = S * P_{agr}$ $S = \frac{n_{cg} - n_r}{n_{cg}}$ $P_{agr} = P_i - P_{cue}$ $P_{tm} = P_{cue} + P_{fe} + P_{fw} + P_{LL} + P_{cur}$ $\eta_m = \left(1 - \frac{P_{tot-mot}}{P_i}\right) 100$ $\eta_{Afd} = \frac{P_{mec entr a c mec}}{T_{pot eléc cons AFD}} = [\%]$	<p>Para la eficiencia del motor a velocidad constante se aplica el método de separación de pérdidas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pérdidas en el cobre del estator o pérdidas eléctricas o perdidas Joule P_{cue} - Pérdidas en el cobre del rotor o P_{cur} - Pérdidas en el núcleo o en el hierro P_{fe} - Pérdidas por fricción y rozamiento con el aire P_{fw} - Pérdidas parásitas en la carga o P_{LL} <p>Se halla la potencia de pérdidas y la eficiencia del motor.</p> <p>P_{cue} = Pérdidas en el cobre del estator</p> <p>R_f = resistencia de fase del bobinado del estator</p> <p>I_f = corriente de fase del motor.</p> <p>$P_{fe} + P_{fw}$ = Pérdidas en el hierro más mecánicas</p> <p>P_i = Potencia de entrada nominal</p> <p>P_{LL} = Pérdidas adicionales con carga</p> <p>P_n = Potencia nominal de placa del motor en watts.</p> <p>K = Porcentaje por tabla respecto de la potencia nominal</p> <p>P_{cur} = Pérdidas en el cobre del rotor</p> <p>S = deslizamiento</p> <p>P_{agr} = potencia que le llega al rotor</p> <p>S = Deslizamiento del motor</p> <p>n_{cg} = Velocidad del campo magnético giratorio</p> <p>n_r = Velocidad real del rotor del motor</p> <p>Para la eficiencia con variador de velocidad se toma como una caja negra el conjunto variador – motor se conoce la potencia de salida (en el eje), se mide la potencia a la entrada del conjunto y se calcula la eficiencia en forma directa.</p>
<p>Determinar requerimiento de Potencia del Variador de velocidad por frecuencia en función del caudal Q para velocidad variable</p>	<p><i>Potencia variador acorde a potencia del motor para que trabajen en forma continua por debajo de la curva de cargabilidad del conjunto</i></p>	<p>El criterio a utilizar es que el motor y variador de velocidad no se tengan que sobredimensionar teniendo en cuenta un trabajo continuo que este por debajo de la curva de cargabilidad del motor con variador. Si el motor con variador tienen que trabajar en forma continua por encima de la curva de cargabilidad, entonces se deberá aumentar la potencia del motor correspondientemente para llegar a la condición marcada al inicio y correspondientemente el variador tendrá que corresponder al motor seleccionado para que todo el conjunto pueda asumir la carga en forma continua sin sobrecargarse</p>
<p>Determinar la eficiencia del</p>		<p>Debido a que la tensión de salida del variador de velocidad no es sinusoidal y tiene un alto contenido armónico no se pueden tomar lecturas con instrumentos</p>

variador de velocidad	$\eta_{m-AFD} = \frac{P_{mec. ent. carga mec.}}{P_{elec.cons.AFD}} *$ $100 = [\%]$	convencionales ni con analizador de red, ya que todos los instrumentos están diseñados para medir un valor eficaz de señal sinusoidal, por lo tanto se debe tomar el conjunto variador motor y se procede en forma directa, donde se calcula la eficiencia del conjunto mediante la relación entre la potencia en el eje del motor (salida mecánica) y la potencia eléctrica consumida a la entrada del variador. Si la potencia se mide a la salida del MCC se deberá restar de esa potencia las pérdidas por conductores hasta la entrada al variador.
Determinar características η_m Vs Q a a) velocidad cte. b) veloc. variable		Calculada la eficiencia del motor a velocidad constante para los diferentes caudales, se construye tabla con el caudal como variable independiente y la eficiencia como dependiente y se grafica característica respectiva. Para el conjunto variador motor para velocidad variable, manteniendo en todo momento la válvula de estrangulamiento completamente abierta, al variar la frecuencia desde 60 Hz hacia abajo la velocidad del motor disminuye, por lo tanto la el caudal de la bomba también disminuye, en cada punto de caudal se calcula la eficiencia del conjunto variador motor, se construye tabla similar a la anterior, con el caudal como variable independiente y se gráfica la característica de eficiencia del variador motor respecto al caudal.
Determinar requerimiento de Potencia del MCC en función del caudal Q para a) velocidad cte. b) veloc. variable	Para el caso del montaje y motor utilizado se tiene - Tabla 430 -150 : FLA Motor (1,2 hp) = 4 A. - Artículo 430-24: Corriente de alimentación MCC= 1,25* In motor = 5 A. - Artículo 430-32: I de disparo Térmico (F.S = 1) = 115% * In = 4 A *1,15 = 4,6 A En el montaje se utilizó un arrancador disponible, no uno previamente seleccionado de acuerdo a cálculos	La definición de las características del centro de Control de motores o del arrancador se da en función de la aplicación de la norma NTC 2050 en sus numerales: - Tabla 430-150 para FLA (full load amperaje) para cargas asociadas a motores (A) - Artículo 430-24 para la corriente mínima de alimentación al MCC (A), - Artículo 430-32 para el Térmico Teniendo en cuenta la operación a velocidad constante o a velocidad variable en función del caudal
Determinar la eficiencia MCC	$\eta_{MCC o Arr.} = \frac{P_{salida MCC o arr.}}{P_{elec.cons.MCC o arr.}} *$ $100 = [\%]$	La eficiencia del MCC o arrancador se hace normalmente en forma directa, esto es, se mide la potencia a la salida del MCC o arrancador (si se mide esta potencia a la entrada del variador o motor se le restará la potencia de pérdidas en conductores) y se mide la potencia a la entrada del MCC o arrancador y la relación entre la primera y la segunda será la eficiencia del MCC o

		arrancador
Determinar la eficiencia del sistema de bombeo	$\eta_{SB} = \eta_b * \eta_{amb} * \eta_m * \eta_{MCC}$	<p>La eficiencia del sistema de bombeo será el producto de las eficiencias de cada uno de los componentes del sistema, esto es de la bomba, el acople, el motor o variador motor y del MCC</p> <p>η_{sb} = Eficiencia del sistema de bombeo $\eta_{MCCo\ arr.}$ = Eficiencia del MCC o Arrancador η_m = Eficiencia del motor η_{acopl} = Eficiencia del acople motor bomba $\eta_{drive-m}$ = Eficiencia del variador-motor η_b = Eficiencia de la bomba</p>
Determinar rango y punto de mayor eficiencia sistema de bombeo en función de Q a: a) velocidad cte. b) veloc. variable		<p>Determinadas las eficiencias de todo el sistema de bombeo tanto a velocidad constante como a velocidad variable en función del caudal, se construyen las tablas respectivas para graficar las características correspondientes de eficiencia y ahora se determina sobre la característica cual es el punto o rango que presenta la mayor eficiencia para ser tenido en cuenta y hacer la operación más eficiente, o en otras palabras lograr el máximo ahorro posible.</p>
Determinar la potencia eléctrica promedio año en función del caudal Q a: a) Velocidad cte. b) Veloc. variable	<p>Para velocidad contante:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Caudales Q año= medidos 2. Tiempo cada Q año= medidos 3. Valores BHP/caudal = medido o calculado (actual medido) 4. $\eta_{sb} = \eta_{MCCo\ arr.} * \eta_m * \eta_{acopl} * \eta_b$ 5. Pot. Consum/Q = medida (HP) 6. $P_{PQ/año} = P_{el/Q} * \%_{tQ/año} \text{ (HP)}$ 7. $P_{prom\ año} = \sum \text{Pesos } P_{Q/año}$. <p>Para velocidad contante: En forma similar cada item</p>	<p>Se debe proceder de la siguiente forma tanto para velocidad constante y velocidad variable:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registrar los diversos caudales de trabajo en el año (curva de demanda año) 2. Registrar tiempo funcionamiento de cada caudal al año. 3. Registrar los valores de BHP para cada caudal 4. Registrar el factor de eficiencia del sistema, que es el producto de las eficiencias de sus componentes/caudal 5. Calcular la potencia consumida para cada caudal 6. Hallar el peso de cada potencia por caudal al año, es el producto de potencia/caudal por % tiempo/caudal año. 7. Determinar la potencia promedio año, que es la suma de los pesos de cada potencia por caudal año.
Determinar la energía eléctrica promedio año en función de Q a: a) Velocidad cte. b) Veloc. variable	$E = P * t$ $E(KWH) = P(HP) * 0,746 \left(\frac{KW}{HP} \right) * 365(días) * 24 \left(\frac{hr}{día} \right)$	<p>Para calcular la energía promedio año en cada modalidad, a velocidad constante y velocidad variable en KWH, ya calculada la potencia promedio año * respectivamente en HP, se multiplica la potencia por el factor para pasar a KW y luego se multiplica por los 365 días del año y las 24 horas del día</p>
Determinar el costo de energía	<p>Para Velocidad constante:</p> $\text{Costo Año}(\$) = P_{pr}(HP) * 0,746 \left(\frac{KW}{HP} \right)$	<p>Para determinar el costo de energía correspondiente a cada una de las modalidades, velocidad constante y</p>

promedio año en función de Q a: a) Velocidad cte. b) Veloc. variable	$\left(\frac{\$}{KWH}\right) * 365(dias) * 24\left(\frac{hr}{dia}\right)$ Para velocidad variable: En forma similar a la anterior	velocidad variable, se multiplica el valor de la energía en cada modalidad por el precio del KWH
Determinar el ahorro de energía debido al uso del variador de velocidad	$AHORRO\ ENER\ G\ I\ A\ A\ N\ O\ (\$) =$ $\$ \text{energía prom año a vel. cte} -$ $\$ \text{energía prom año a vel. variab}$	El ahorro de energía debido al uso del variador de velocidad se determina por la sustracción entre el costo de energía promedio año a velocidad constante y el costo de energía promedio año a velocidad variable, siendo este último costo normalmente bastante menor que a velocidad constante
Inclusión de variador de velocidad en sistema bombeo como proyecto de eficiencia energética	- Costo de desarrollo- diseño - Costo de justificación o ventas- Identificación ahorros y beneficios - Costo de montaje- Adquisición, instalación y pruebas de sistema a velocidad variable - Costo de producción- Requerimientos de operación y mantenimiento nuevo sistema - Ingresos – Ahorro de energía y beneficios adicionales si los hay.	Teniendo en cuenta los elementos cuantitativos de un proyecto, en este caso de eficiencia energética, se deben realizar los estudios técnicos, de justificación y financiero, entre los principales. Con estos estudios y un tiempo de vida útil del proyecto, se arma el flujo de fondos del proyecto, el que debe contener los 5 elementos: - Costo de desarrollo, - Costo de justificación o ventas, - Costo de montaje - Costo de producción - Ingresos Este flujo de fondos así construido será la herramienta base para la evaluación financiera
Hacer Análisis de viabilidad VPN, TIR, PRI		Tomando como referente el flujo de fondos y definiendo la tasa de oportunidad del inversionista se hace la evaluación financiera del proyecto utilizando los tres métodos: - PRI= Periodo de recuperación de la inversión - VPN = Valor Presente Neto - TIR = Tasa Interna de Retorno
Hacer Análisis de PRI		Determinar en cuanto tiempo se recupera la inversión Lo deseable para los inversionistas es que PRI < 2 años. Entre más rápido se recupere el dinero invertido mucho más atractivo es el proyecto.
Hacer Análisis de viabilidad VPN	$VN = Beneficios - Costos$ $VP = \frac{VN}{(1 + iop)^n}$ $VPN = \sum_{n=0}^n \frac{VN_n}{(1 + iop)^n}$	VN = Valor Neto VP = Valor Presente Iop = Tasa de interés de oportunidad del inversionista N = último período de vida útil del proyecto

	<p><i>Si VPN > 0 , proy. OK</i></p> <p><i>Si VPN = 0 , proy. es indiferente</i></p> <p><i>Si VPN < 0 , proy. NO OK</i></p>	
Hacer Análisis de viabilidad TIR	 $\frac{I2 - I1}{I2 - TIR} = \frac{VPN1 + VPN2 }{VPN2}$ $TIR = I2 - \left(\frac{(I2 - I1) VPN2}{VPN1 + VPN2} \right)$ <p><i>Si TIR > TO → Proy OK</i></p> <p><i>Si TIR = TO → Proy Indifer.</i></p> <p><i>Si TIR < TO → Proy NO OK</i></p>	<p>Se aplica el método gráfico para determinar el valor de la TIR.</p> <p>Se aplica el criterio como se muestra y se sabe si el proyecto es viable o no.</p>
Análisis proyecto varios escenarios		En el mismo proyecto se simulan diversas formas de financiamiento del proyecto para determinar la más conveniente

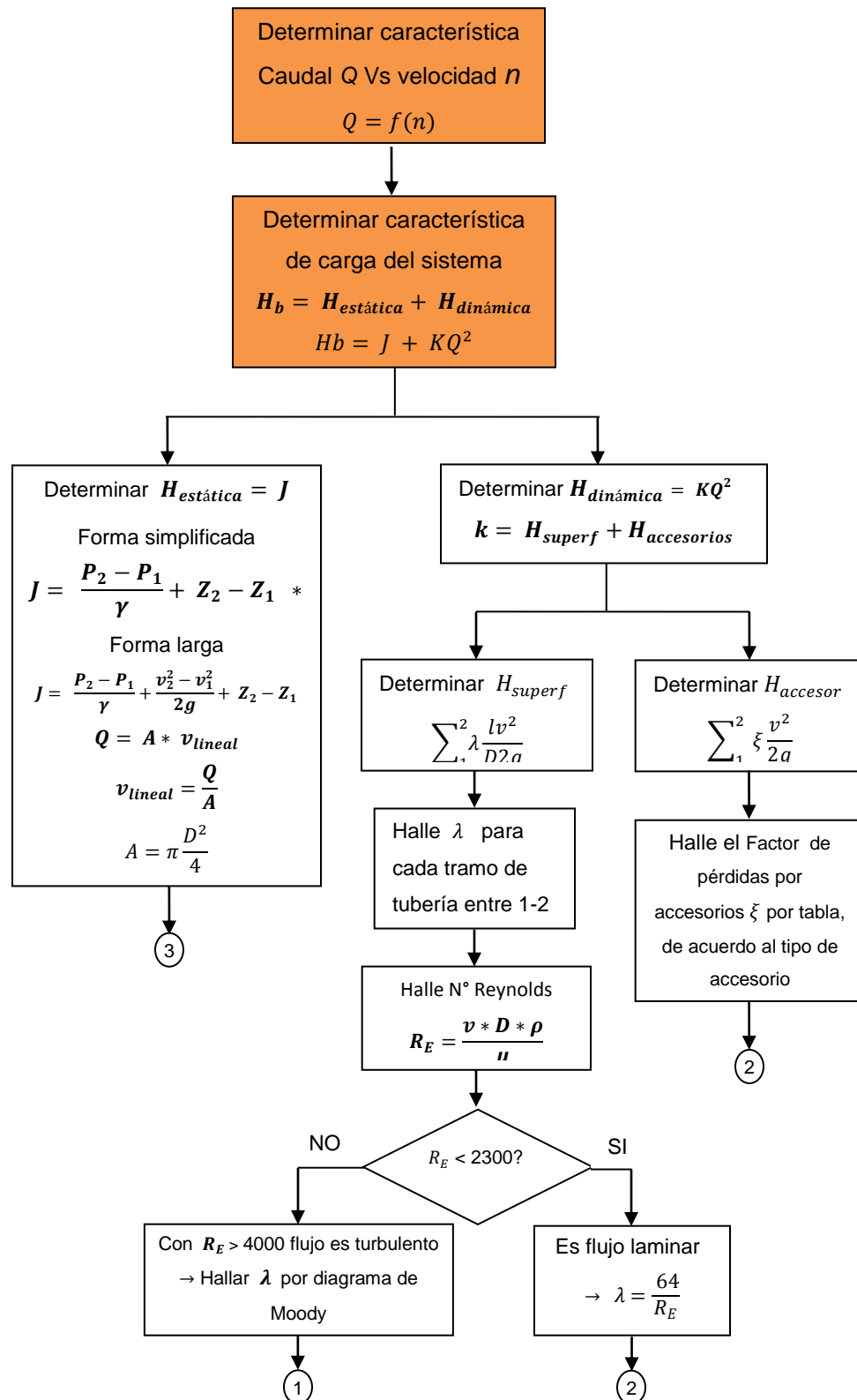
Fuente: El autor

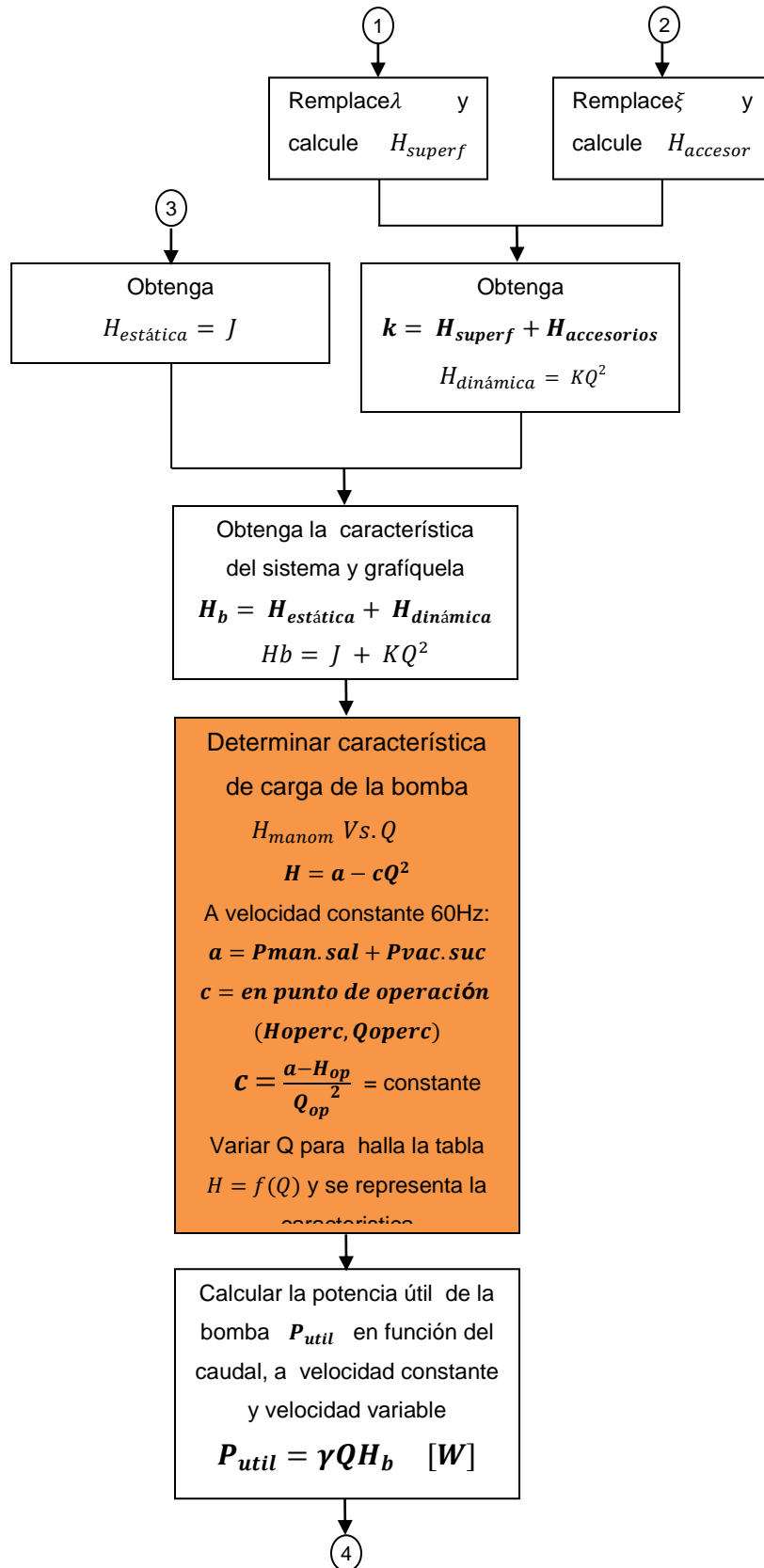
5.3 MODELO O SECUENCIA DE PASOS PARA OPTIMIZACIÓN DE USO DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE BOMBEO

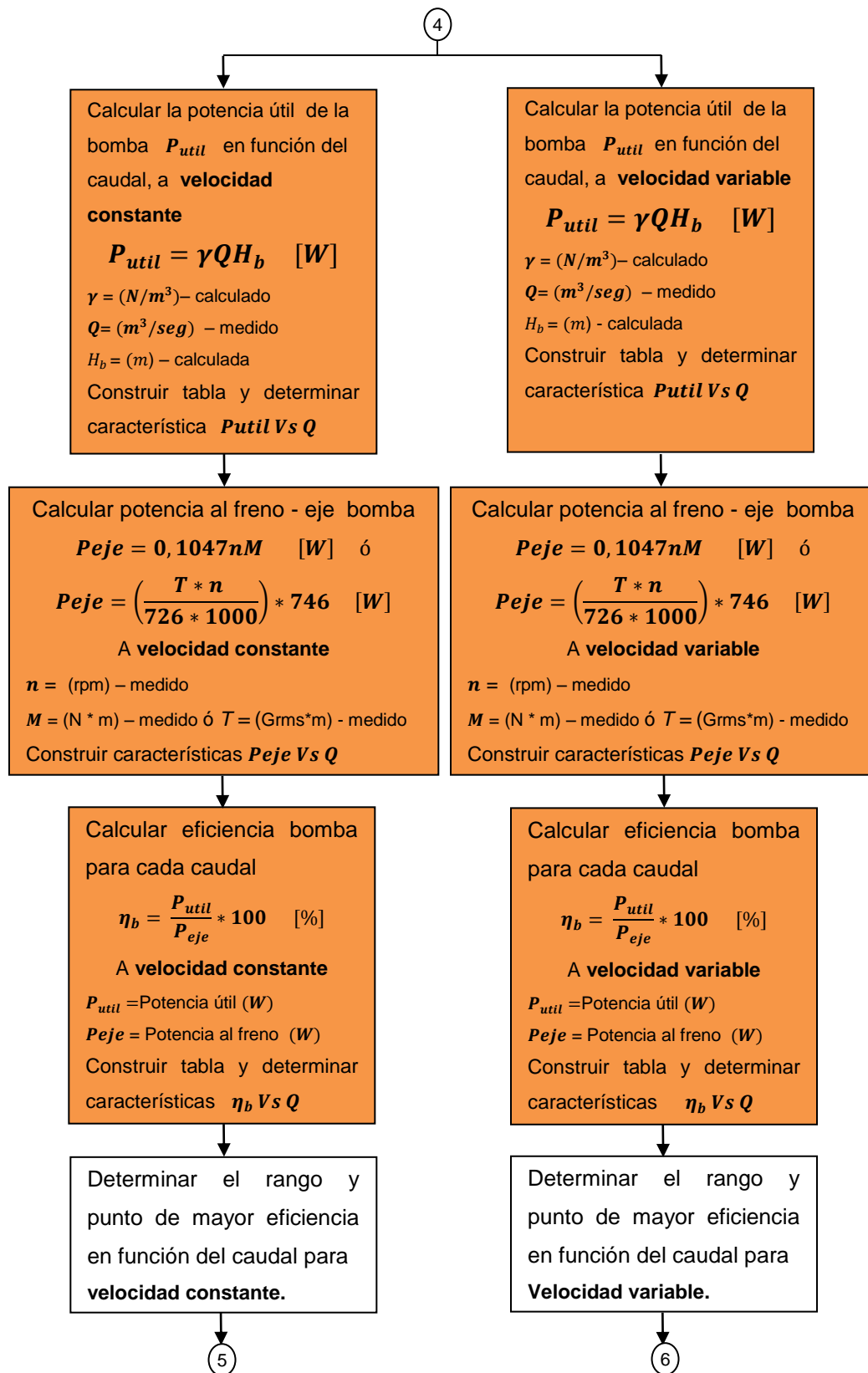
En la figura 5 se muestra el modelo o secuencia de pasos diseñado con base en el procedimiento indicado en la figura 4, con los pasos, mediciones y cálculos para realizar el análisis energético del sistema de bombeo por componentes y completo.

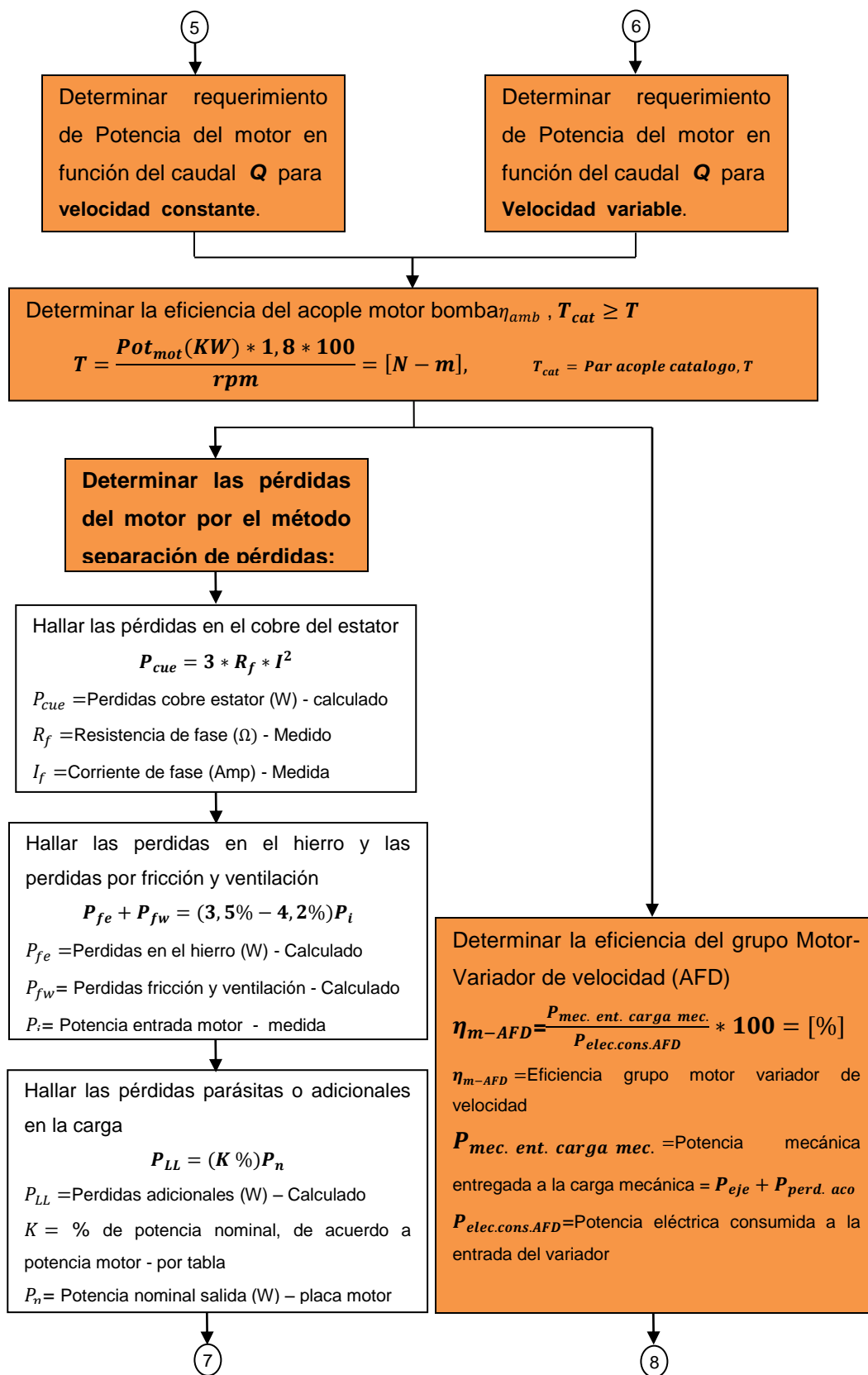
El procedimiento de la figura 4, este modelo, y la herramienta diseñada en Excel, facilita la obtención de las características energéticas de los componentes del sistema de bombeo y el punto o sector donde éste podrá trabajar a la mayor eficiencia, con o sin variador de velocidad. Permite hallar el ahorro energético debido al empleo del variador de velocidad o AFD y la formulación y evaluación del proyecto de implementación de este AFD. .

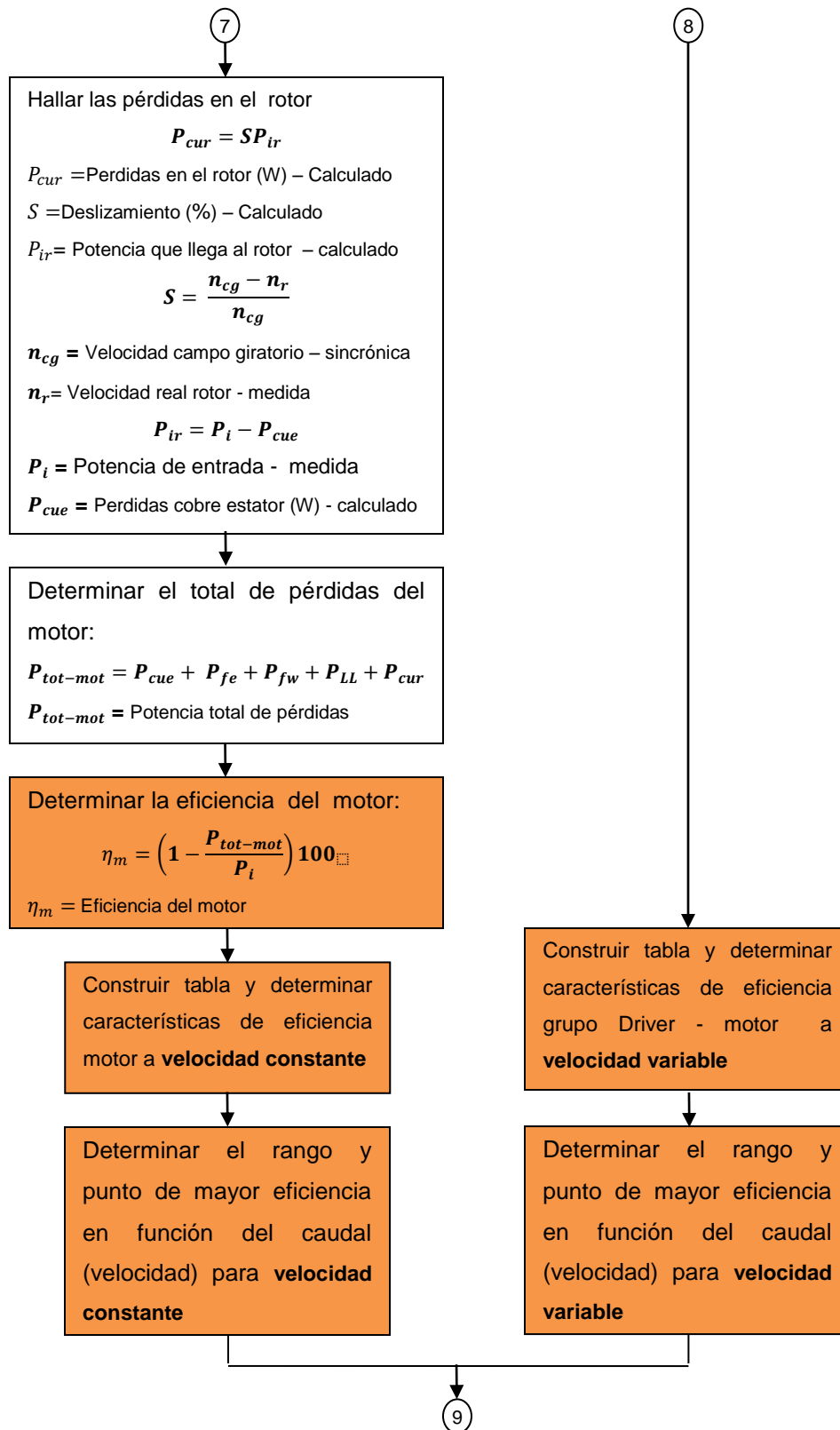
Figura 5. Modelo para optimización de energía en sistemas de bombeo

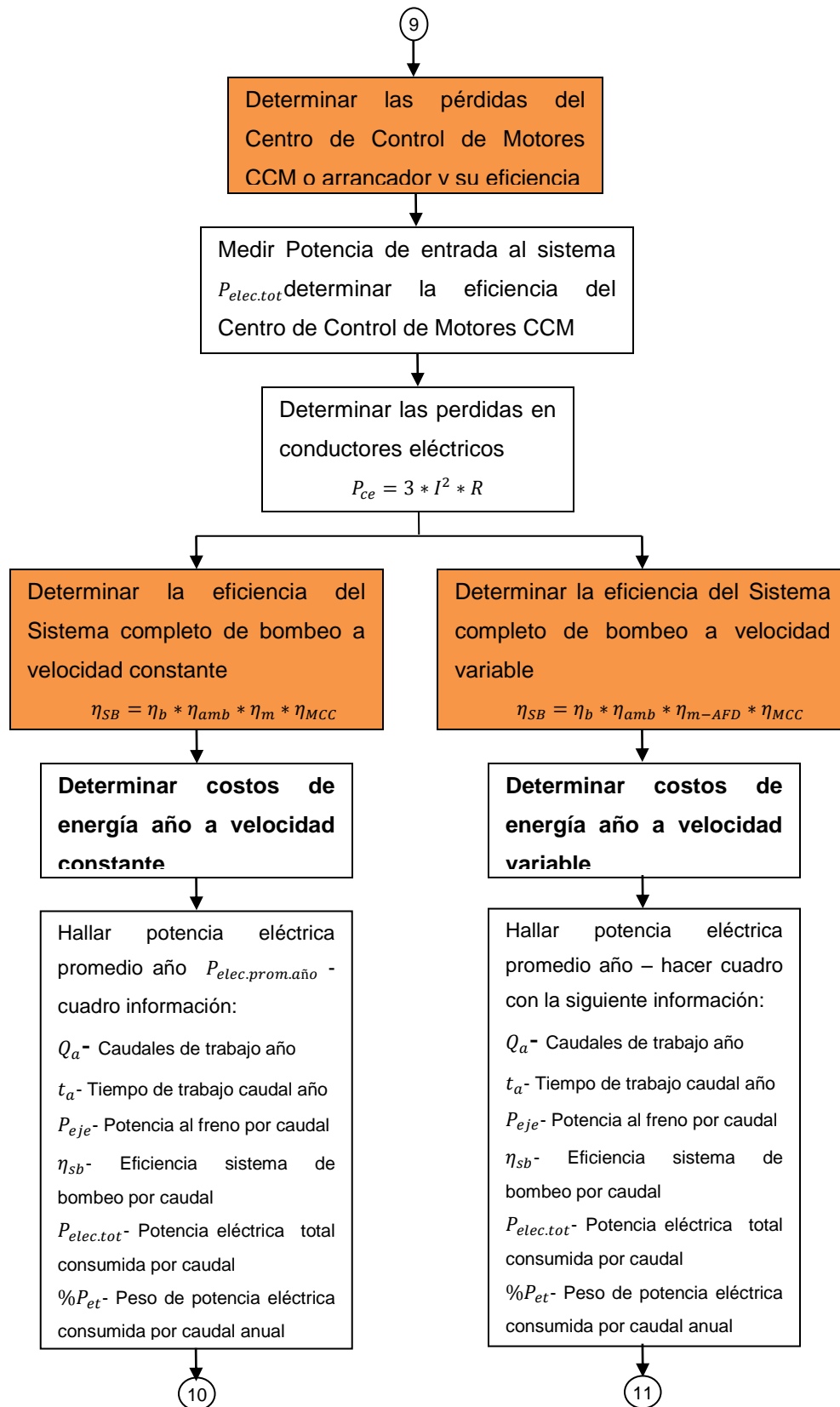


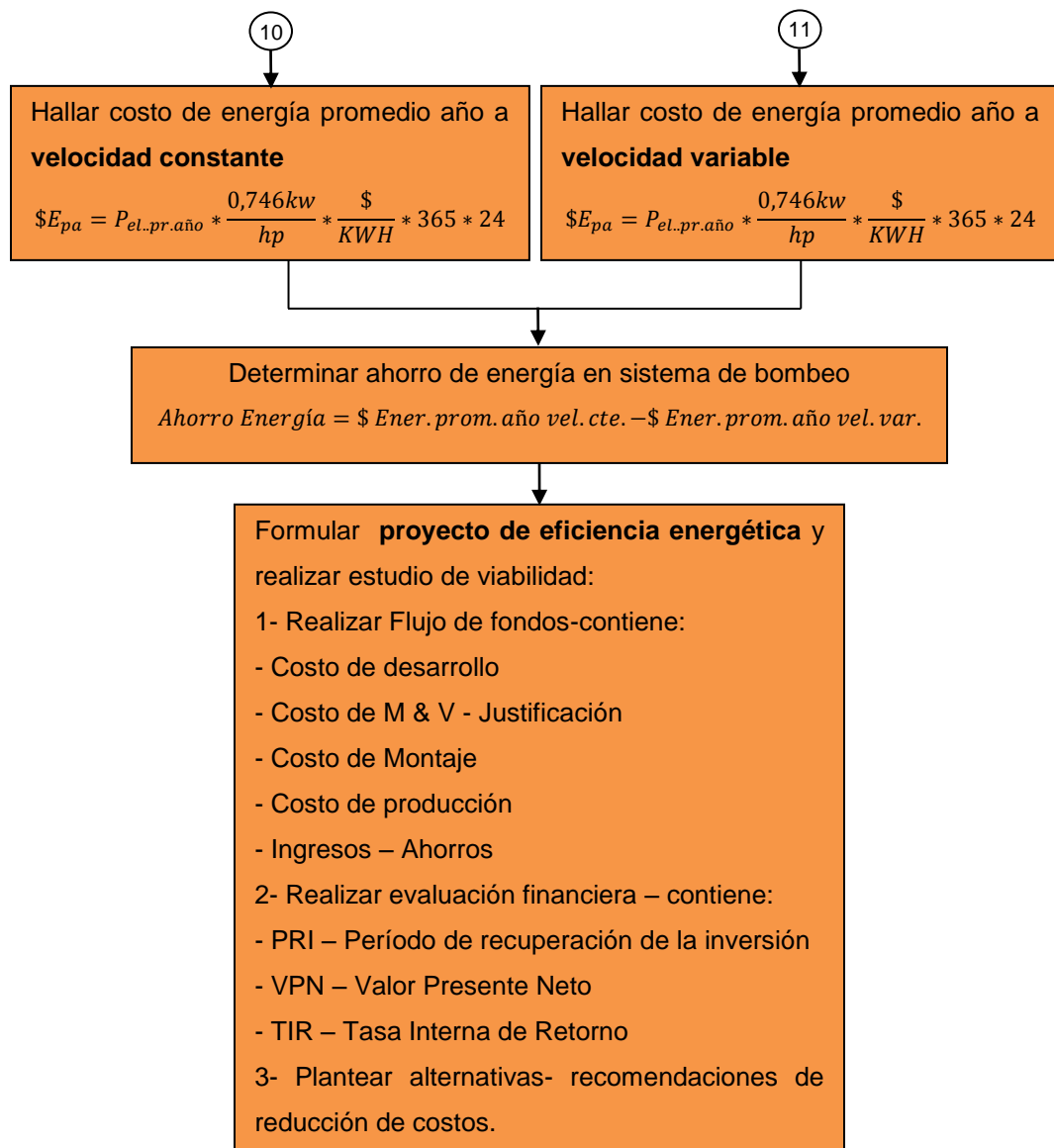












Fuente: El autor

En el procedimiento y en el modelo se indican las fórmulas con sus aclaraciones correspondientes, en el marco teórico del anexo A, está la fundamentación conceptual, sin embargo . a continuación se amplía parte de estas aclaraciones, principalmente la parte inicial correspondiente al análisis de la bomba y la carga del sistema.

La parte del sistema donde mayores pérdidas de energía se presenta es en la bomba centrífuga, debido al proceso de transformación de energía mecánica a energía hidráulica.

Para el análisis energético se debe calcular y graficar la característica de eficiencia tanto para cada componente como para el sistema completo en función de la variación del caudal a velocidad constante (sin variador de velocidad) y a velocidad variable (con variador de velocidad)..

Con el propósito de determinar las características de eficiencia para cada caso se puede proceder de la siguiente manera

La eficiencia de la bomba es

$$\eta_b = \frac{P_{util}}{P_{eje}} \quad (1)$$

Por lo tanto se debe determinar los dos elementos de la razón. La potencia útil de un sistema considerando la bomba con la red de carga evaluada desde un punto 1 en la succión de la bomba hasta un punto 2 en la red de carga se determina mediante

$$P_{util} = \gamma Q H_b \quad (2)$$

Donde:

P_{util} = Potencia Util (W)

Q = Caudal útil (m^3/seg)

H_b = Altura o cabeza alcanzada por la bomba (m)

γ = Peso específico (N/m^3)

Si se quisiera determinar la potencia útil solamente de la bomba se evaluaría en función del delta de presiones entre la descarga a la salida de la bomba y la succión, mediante la expresión.

$$P_{util} = Q \Delta Presiones \quad (3)$$

En la ecuación (2) H_b simplificando queda de la forma:

$$H_b = J + KQ^2 \quad (4)$$

Donde el valor de J en forma simplificada o corta queda:

$$J = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + Z_2 - Z_1 \quad (5)$$

Y en forma alargada o completa queda

$$J = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 \quad (6)$$

y el valor de k en forma simplificada queda

$$k = \frac{1}{2gA^2} \left(\sum_1^2 \lambda \frac{l}{d} + \sum_1^2 \xi \right) \quad (7)$$

De otra manera también se puede determinar como

$$k = \lambda \frac{lv^2}{D2g} + \xi \frac{v^2}{2g} \quad \text{ó} \quad k = \frac{v^2}{2g} \left(\sum_1^2 \lambda \frac{l}{d} + \sum_1^2 \xi \right) \quad (8)$$

Se sabe que

$$Q = A * v_{lineal} \quad (9)$$

Teniendo el diámetro se calcula el área

$$A = \pi \frac{D^2}{4} \quad (10)$$

Entonces se puede determinar la velocidad lineal v_{lineal} para cada tramo recto de tubería y accesorios.

El valor de λ que es el factor pérdida de carga en una tubería lisa se determina teniendo en cuenta el número de Reynolds:

$$R_E = \frac{v * D * \rho}{\mu} \quad (11)$$

Donde

R_E = Número de Reynolds

v = velocidad lineal del fluido

D = diámetro interno del tubo por donde pasa el fluido

ρ = Densidad del fluido

μ = viscosidad del fluido

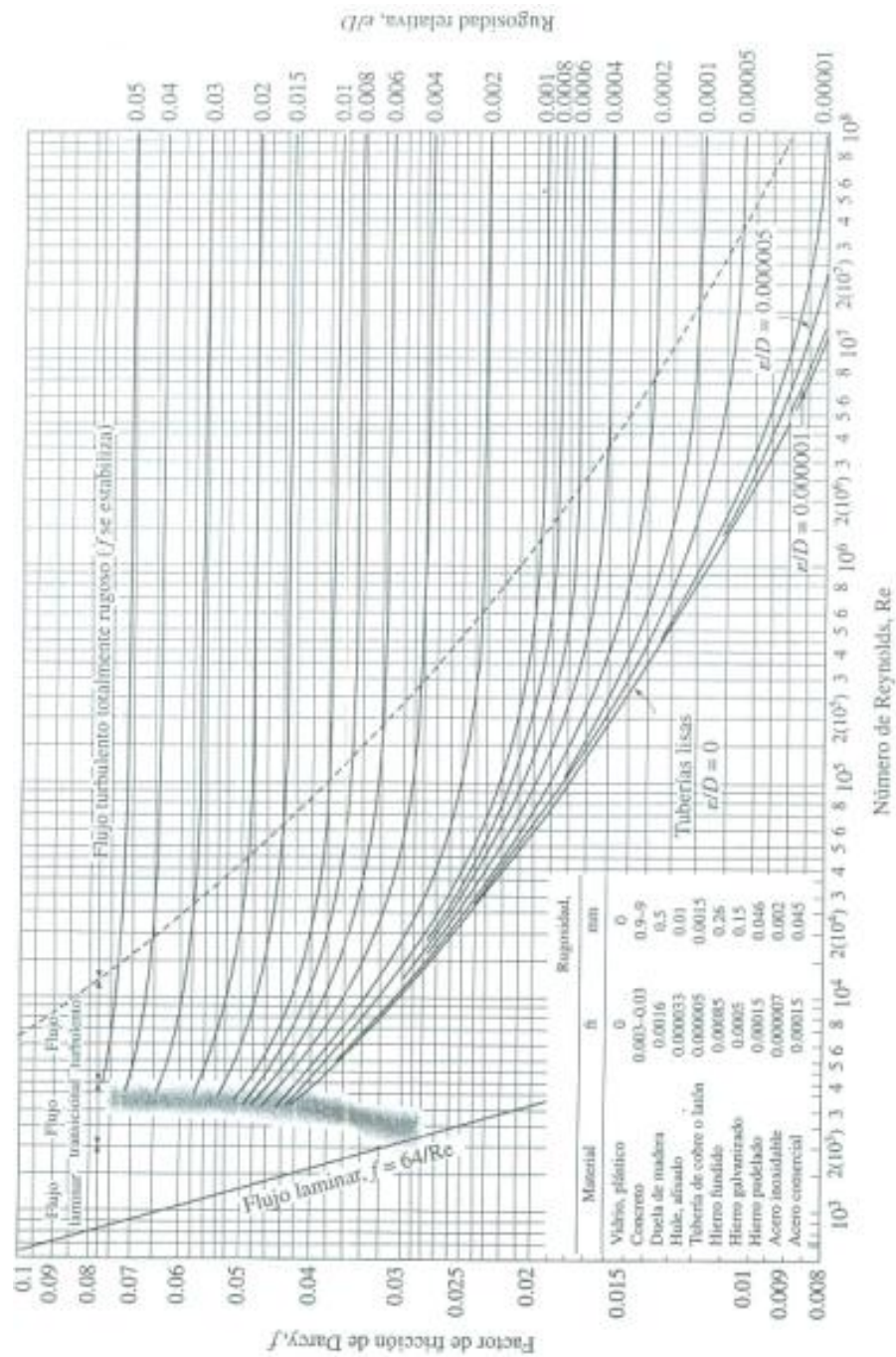
Si el número de Reynolds $R_E < 2300$ entonces se tiene Flujo Laminar. Para este caso se toma

$$\lambda = \frac{64}{R_E} \quad (12)$$

Si el número de Reynolds $R_E > 4000$ entonces se tiene Flujo Turbulento. Para este Caso λ se determina mediante el Diagrama de Moody. El cual se muestra en la figura N° 6 En el diagrama de Moody el factor λ es el mismo factor f .

El valor de ξ que es el factor pérdida de carga en accesorios depende de la geometría del accesorio, para lo cual se utilizan las tablas respectivas. En la tabla N° 1 se muestran las principales características

Figura 6. Diagrama de Moody



El diagrama de Moody para el factor de fricción para flujo totalmente desarrollado en tuberías circulares para usar en la relación de pérdida de carga $h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$. Los factores de fricción en el flujo turbulento se evalúan a partir de la ecuación de Colebrook $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{e/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$.

Fuente: [36] Yunus, A. Cengel. John, M. Cimbala. Mecánica de Fluidos. Fundamentos y aplicaciones. Mac Graw Hill. 2006. ISBN 13. 978-970-10-5612-7

Tabla 1. Coeficiente de perdidas $k = \xi = \frac{v^2}{2g}$ para válvulas, codos y Tes.

	Diámetro nominal, in								
	Roscado				Acoplado				
	$\frac{1}{2}$	1	2	4	1	2	4	8	20
Válvulas (abiertas):									
Esférica	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5
Compuerta	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03
De retención	5.1	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Angulo	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0
Codos:									
45° normal	0.39	0.32	0.30	0.29					
45° suave					0.21	0.20	0.19	0.16	0.14
90° normal	2.0	1.5	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21
90° suave	1.0	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10
180° normal	2.0	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20
180° suave					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10
Tes:									
Flujo directo	0.90	0.90	0.90	0.90	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07
Flujo lateral	2.4	1.8	1.4	1.1	1.0	0.80	0.64	0.58	0.41

Fuente: [36] Yunus, A. Cengel. John, M. Cimbala. Mecánica de Fluidos. Fundamentos y aplicaciones. Mac Graw Hill. 2006. ISBN 13. 978-970-10-5612-7

Después de calculadas las perdidas por fricción y accesorios que constituyen la carga dinámica se suma a la carga estática y se obtiene el valor de H_b ; luego se multiplica por el peso específico γ y por el caudal Q para completar el cálculo de la potencia útil del sistema.

$$P_{util} = \gamma Q H_b \quad (13)$$

Como se estudió en un apartado anterior, también se podría calcular con:

$$P_{util} = \frac{\rho g Q H_b}{1000} [KW] \quad (14)$$

Donde

P_{util} = Potencia útil ó Potencia hidráulica (KW)

Q = Caudal útil (m^3/seg)

H_b = Altura útil o cabeza (m)

ρ = Densidad del fluido en (Kg/m^3)

g = Aceleración de la gravedad (m/seg^2)

O en el sistema ingles se puede expresar como

$$HHP = \frac{QH_b SG}{3960} [hp] \quad (15)$$

Donde

HHP = Potencia útil ó Potencia hidráulica (hp)

Q = Caudal útil (gpm)

H_b = Altura útil o cabeza (ft)

SG = Gravedad específica = 1

Ahora se debe calcular la potencia en el eje de la bomba o potencia al freno P_{eje} , para esto hay varias alternativas como se estudio en la parte de fundamentación:

1- tomar las mediciones directas de Par y velocidad en el banco de prueba se obtiene

$$Peje = 0,1047nM \quad [W] \quad (16)$$

La cual se mide en el eje de la bomba con n - en rpm y M - en N * m, con su correspondiente factor de corrección.

Como la medición directa del par se hace con el brazo y la balanza correspondiente, tomando la longitud del brazo en metros y la fuerza en gramos se puede utilizar la siguiente expresión para calcular la potencia en el eje en vatios:

$$Peje = \frac{T*n*746}{1000*726} [W] \quad (17)$$

Donde

T = gramo metro

n = rpm

Como se requiere determinar la eficiencia de la bomba, ya que no se conoce, La fórmula anterior resulta muy útil

2- Si se conoce la eficiencia de la bomba se podría utilizar:

$$Peje = BHP = \frac{QHSG}{3960 \cdot \eta_b} [hp] \quad (18)$$

Donde

BHP = Potencia al freno ó potencia en el eje (hp)

Q = Caudal útil (gpm)

H = Altura útil o cabeza (ft)

SG =Gravedad específica

Calculadas las dos potencias P_{util} y $Peje$ ahora se puede determinar la eficiencia de la bomba para cada valor de caudal y trazar la característica η_b Vs Q .

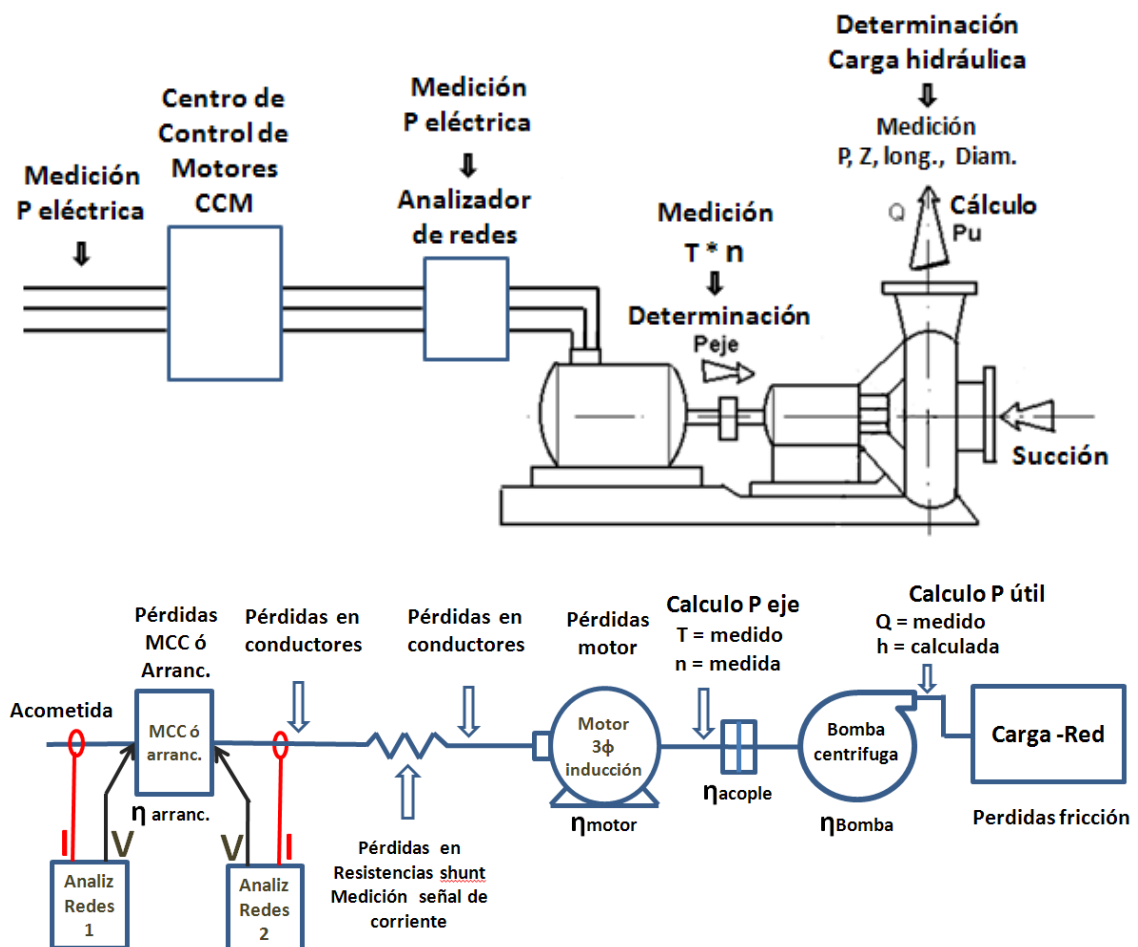
$$\eta_b = \frac{P_{util}}{P_{eje}} \quad (19)$$

Los cálculos realizados para las otras partes del sistema se presentan en el procedimiento y modelo diseñados. A continuación se presentan los montajes y mediciones realizadas tanto a velocidad constante como a velocidad variable para el análisis energético del sistema.

5.4 MONTAJE Y MEDICIONES A VELOCIDAD CONSTANTE

En la figura 7 se muestra el montaje realizado con la instrumentación correspondiente para las mediciones a velocidad constante (sin variador de velocidad). Los resultados de las mediciones se muestran en el Anexo B en Excel y sirven para alimentar la información presentada en el ítem 6.6 Resultados pruebas.

Figura 7. Montaje y mediciones del sistema de bombeo a velocidad constante

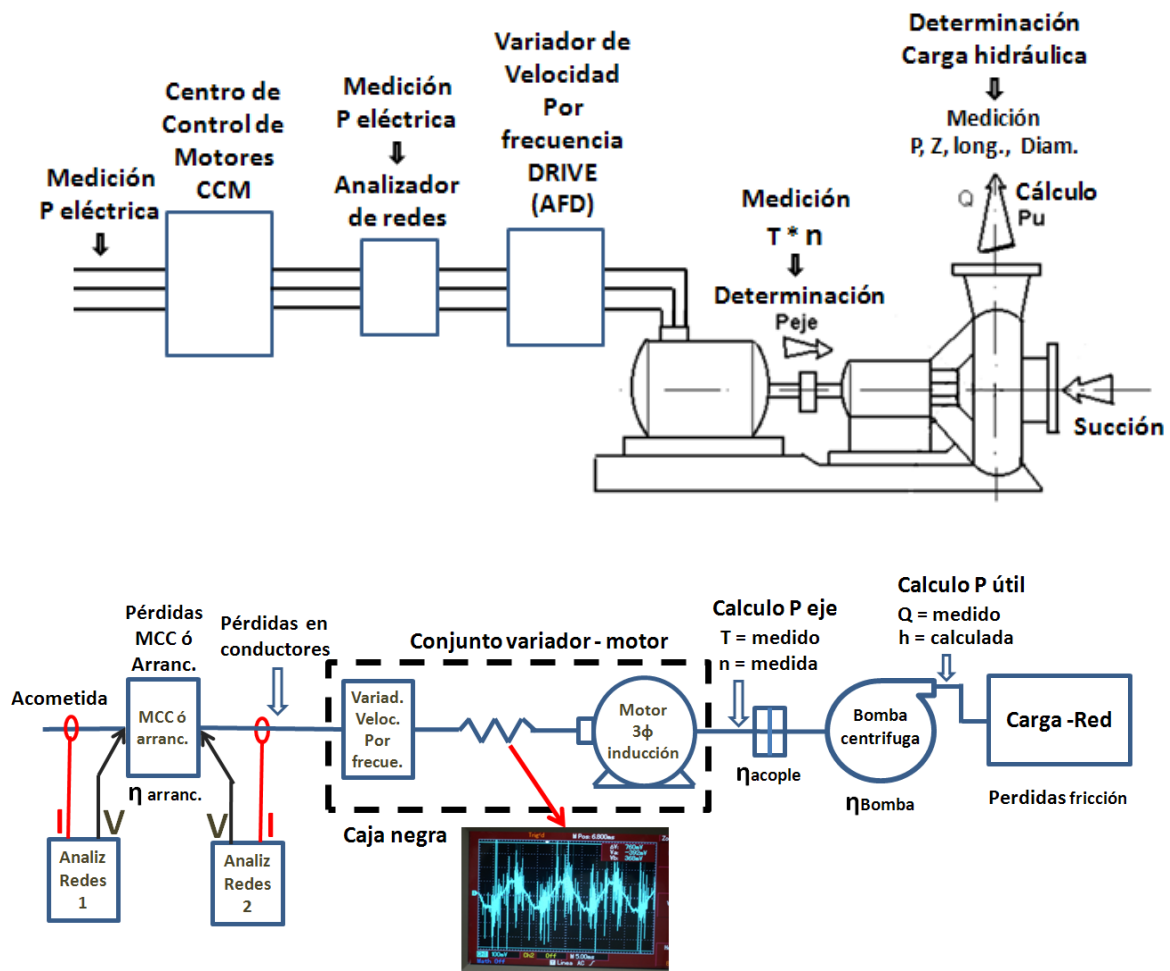


Fuente: El autor

5.5 MONTAJE Y MEDICIONES A VELOCIDAD VARIABLE

En la figura 8 se muestra el montaje realizado con la instrumentación correspondiente para las mediciones a velocidad variable (con variador de velocidad). Los resultados de las mediciones se muestran en el Anexo C en Excel y sirven para alimentar la información presentada en el ítem 6.6 Resultados pruebas.

Figura 8. Montaje y mediciones del sistema de bombeo a velocidad variable (con variador de velocidad)



Fuente: El autor

5.6 RESULTADOS PRUEBAS

Con base en el diseño del procedimiento, el modelo y la herramienta en Excel se realiza el análisis energético al sistema de bombeo y el análisis técnico económico del mismo.

El montaje presentado se realizó con base en los equipos disponibles en los laboratorios de la Universidad Autónoma de Occidente a partir de la bomba centrífuga existente en el banco de pruebas del laboratorio de fluidos, la cual era movida por un motor de corriente continua de 1KW a 3000 rpm y se busco el motor de corriente alterna de inducción tipo Jaula de ardilla, en existencia, que más se aproximara a esta potencia para tratar de mantener las características originales del banco de prueba, pero no corresponden estrictamente a un proceso de selección previo, el cual hubiese implicado la compra de equipos nuevos.

Con base en lo anterior, las mediciones cálculos y características se presentan desde la carga hacia atrás, aguas arriba y se analiza cada parte, primero a velocidad constante luego a velocidad variable. Las mediciones se realizan en unidades del SI y también en el sistema ingles con los conversiones respectivas.

5.6.1 Herramienta en Excel para análisis técnico - económico.

La herramienta o aplicativo diseñado en Excel, es una herramienta manual que permite de una forma relativamente sencilla y amigable por parte del usuario, ir alimentando las tablas con la información de las características y resultados de las pruebas, para la construcción y representación de las características de carga del sistema, carga de la bomba, potencias y eficiencias de cada uno de los componentes de los sistemas de bombeo tanto a velocidad constante como a velocidad variable y su comparación, para lograr mediante el análisis de éstos, hacer el diagnóstico de los componentes y sistemas, encontrar el punto o sector

de mayor eficiencia energética debido a la acción del variador de velocidad AFD y formular y evaluar el proyecto de implementación de dicho variador de velocidad.

Esta herramienta o aplicativo se diseña con base en el modelo propuesto y es el elemento que permite visualizar el funcionamiento energético del sistema de bombeo y hacer el diagnóstico y el proyecto de eficiencia energética. Por su importancia, al final de este informe se dedica un ítem para la descripción detallada del funcionamiento de la misma para su aplicación general.

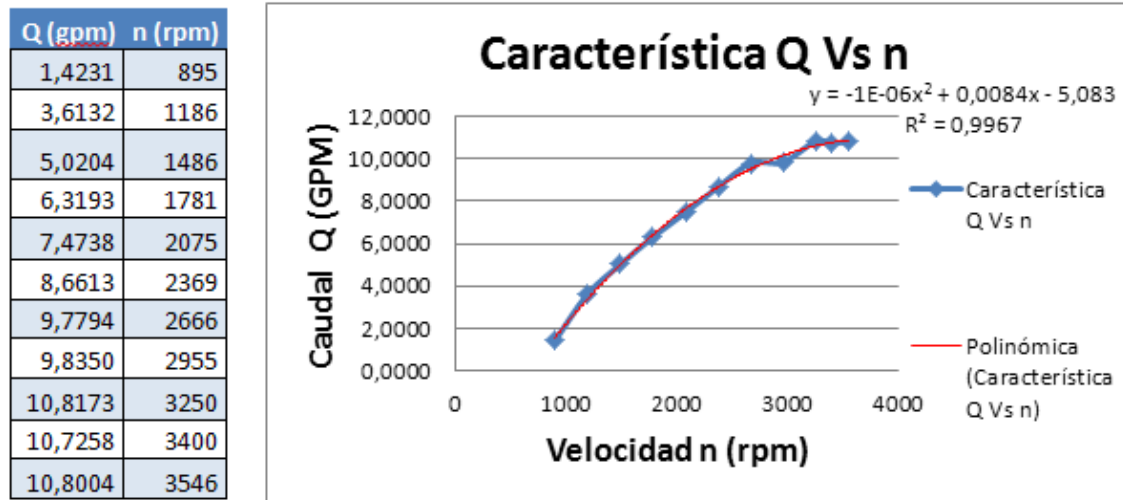
A continuación se aplica la herramienta para el funcionamiento del sistema a velocidad constante, se describen los pasos realizados en orden y se remite al lector al anexo F, a la zona referenciada que se esté tratando para ver en conjunto la herramienta con sus tablas y gráficas y entender su funcionamiento. En el informe se presentarán las gráficas fundamentales que se requiera para aportar en el análisis.

5.6.2 Características y análisis de la potencia y eficiencia de cada componente del sistema de bombeo a velocidad constante.

Inicialmente es útil representar la característica de caudal de la bomba en función de la velocidad, para identificar las zonas de funcionamiento de la misma y tratar de definir un punto de operación adecuado de referencia. Logrado esto se procede a seguir la secuencia de pasos definida en el modelo para hallar las características de eficiencia de los componentes del sistema a velocidad constante.}

5.6.2.1 Característica caudal versus velocidad. En la figura 9 se observa la característica de Caudal Q en función de la velocidad. Se muestra la tabla de datos construida en Excel mediante la prueba realizada. En la característica se observa la línea de tendencia polinómica en color rojo, la cual contiene un 99,67% de los puntos reales de la prueba.

Figura 9. Característica Caudal Q de la bomba Vs velocidad n



Fuente: El autor

De esta característica se observa tres zonas, la zona lineal, zona del codo de saturación y zona saturada. Después del codo de saturación por más velocidad que se aumente en el eje de la bomba, no va a aumentar más su caudal. .

Teniendo en cuenta el concepto de eficiencia, lo más conveniente es tomar un punto de caudal Q en el codo de saturación como caudal base con el cual se realizan los cálculos básicos para hallar el comportamiento del sistema y determinar la característica de carga del mismo.

Se toma Q base = 10,6383 gpm.

Haciendo conversión al SI se tiene

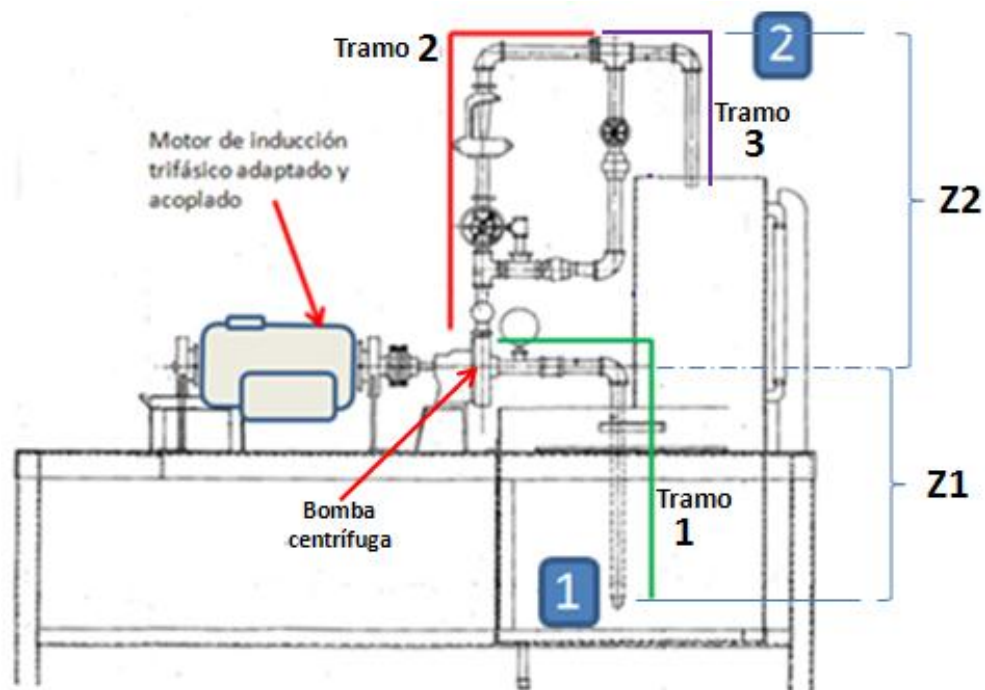
$$\frac{10,6383 \text{ gln}}{\text{min}} * \frac{0,0037854 \text{ m}^3}{1 \text{ gln}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 0,00067117 \text{ m}^3/\text{seg} \quad (20)$$

5.6.2.2 Característica de carga del sistema. Siguiendo el modelo o secuencia de pasos, la característica de carga del sistema representa a la red hidráulica del mismo y tiene dos componentes, la carga estática y la carga dinámica, siendo la

carga estática equivalente a la diferencia de elevación entre el punto más alto de la red y el bajo de la succión respecto al centro de la bomba a flujo cero. La carga dinámica es equivalente a las pérdidas en la tubería y a las pérdidas en los accesorios.

Como se muestra en la Figura 10, el sistema va desde el punto más bajo 1 hasta el más alto el 2 y se han definido tres tramos de tubería en los cuales están los tramos rectos de la misma y los accesorios. Siguiendo el modelo, ver en la herramienta en Excel, anexo F la zona de *Determinación de la característica de carga del sistema, determinación de carga estática y carga dinámica*

Figura 10. Tramos definidos de tubería del circuito de carga para calcular y determinar la característica de carga del sistema



Fuente: El autor y diagrama de banco de prueba para determinar características de bomba centrífuga laboratorio de fluidos Universidad Autónoma de Occidente

En la herramienta en Excel, las celdas de color verde son para alimentarlas con información por parte del usuario. En este caso se alimenta con la información correspondiente a:

Q_1 (m³/seg) = caudal de trabajo en el punto 1 en metros cúbicos por segundo

D_1 (m) = Diámetro de la tubería en el punto 1 en metros (la tubería es de $\frac{3}{4}$ ")

Q_2 (m³/seg) = caudal de trabajo en el punto 2 en metros cúbicos por segundo

D_2 (m) = Diámetro de la tubería en el punto 2 en metros (la tubería es de $\frac{3}{4}$ ")

Z_2 (m) = Distancia vertical desde el punto 2 del sistema al centro de la bomba

Z_1 (m) = Distancia vertical desde el punto 1 del sistema al centro de la bomba

L (m) = longitud de cada tramo considerado de tubería dada en metros

D (m) = diámetro de la tubería en metros, para el caso, toda la tubería es $\frac{3}{4}$ "

Q (m³/seg) = caudal de trabajo en metros cúbicos por segundo = $Q_1 = Q_2$

ξ = Factor de pérdidas de accesorios

λ = Factor de pérdida de carga en una tubería

Generalmente la tubería de descarga de la bomba se conecta al recipiente de descarga por la parte inferior del mismo, como se muestra en la figura 3 del marco teórico Anexo A , sin embargo en el montaje existente, la tubería de descarga llega por encima de éste recipiente alimentándolo por gravedad, de otra parte, por lo general como puntos 1 y 2 para el sistema, se toman los niveles en los recipientes de succión y de descarga, como aquí la distribución de la tubería no es como el caso común, entonces se toma como distancias z_1 desde el extremo de la tubería de succión hasta el centro de la bomba, siendo este un valor negativo y Z_2 se toma desde el punto más alto de la tubería de descarga al centro de la bomba, el delta z como es la diferencia entre Z_2 y Z_1 finalmente suma los valores de distancia.

En el anexo F, en la tabla del coeficiente equivalente de pérdidas por fricción, se aprecian los tres tramos de tubería y accesorios correspondientes con el respectivo factor de fricción por accesorios hallado previamente por tabla, se halla el valor total de perdidas

Siguiendo la herramienta en Excel y los cálculos que se realizan, se tiene la ecuación de la característica de carga del sistema:

$$H_s = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + Z_2 - Z_1 + KQ^2 \quad (21)$$

$$H_s = H_{estática} + H_{dinámica} \quad (22)$$

$$H_s = \Delta Z + H_f \quad (23)$$

$$H_s = J + KQ^2 \quad (24)$$

Se calcula el área transversal de la tubería en metros cuadrados, sabiendo que:

$$A[m^2] = \frac{D^2}{4} \quad (25)$$

Luego calcula la velocidad lineal del fluido en metros por segundo, en cada tramo, sabiendo que:

$$v[\frac{m}{seg}] = \frac{Q}{A} \quad (26)$$

Así se determina el valor de la carga estática J mediante

$$H_{estática} = J = \cancel{\frac{P_2 - P_1}{\gamma}} + Z_2 - Z_1 = Z_2 - Z_1 = 0.66 + 0.45 = 1.11m \quad (27)$$

Ahora para determinar la carga dinámica se debe partir de:

$$H_{dinámica} = H_f = KQ^2 \quad (28)$$

Sabiendo que

$$k = \lambda \frac{lv^2}{D2g} + \xi \frac{v^2}{2g} = \frac{8\lambda l}{g\pi^2 D^5} + \frac{8k}{g\pi^2 D^4} \quad (29)$$

Pérdidas fricción tubería Perdidas fricción accesorios

Entonces, para determinar el coeficiente de fricción para tubería λ , se debe primero calcular el número de Reynolds mediante:

$$R_E = \frac{v^* D^* \rho}{\mu} \quad (30)$$

Ya calculado se pueden dar tres situaciones:

Si $R_E < 2300 \rightarrow$ el flujo es laminar y $\lambda = \frac{64}{R_E}$

Si $R_E > 4000 \rightarrow$ el flujo es Turbulento y λ se determina por el diagrama de Moody

Si $2300 < R_E < 4000 \rightarrow$ el flujo es de transición y se le da tratamiento como si fuera un flujo turbulento y λ se determina por el diagrama de Moody

El número de Reynolds dio mayor a 4000 y se determinó por el Diagrama de Moody con el valor que se indica en Excel. También se calculó el factor de perdidas por accesorios ξ , como se indica en el anexo F en la tabla de determinación de la carga dinámica. Ahora si se aplica la ecuación para hallar el valor de K de la carga dinámica en cada tramo y el total de los tres tramos.

$$k = \lambda \frac{lv^2}{D2g} + \xi \frac{v^2}{2g} \quad (31)$$

Como corroboración también se hace por la formula

$$k = \frac{8\lambda l}{g\pi^2 D^5} + \frac{8k}{g\pi^2 D^4} \quad (32)$$

Y se obtiene el mismo resultado

Ahora ya se tiene el valor de J para la carga estática y el valor de k para la carga dinámica, por lo que se tiene la ecuación de la característica de carga del sistema

$$H_s = J + KQ^2 \quad (33)$$

De Excel se obtiene

$$H_s = 1,11 + 8,9939 Q^2 \quad (34)$$

En la tabla 2 se presenta una imagen de la tabla construida en la herramienta en Excel, anexo F para realizar la característica de carga del sistema.

Tabla 2. Tabla de la herramienta en Excel para construir las características de carga del sistema y carga de la bomba a velocidad constante.

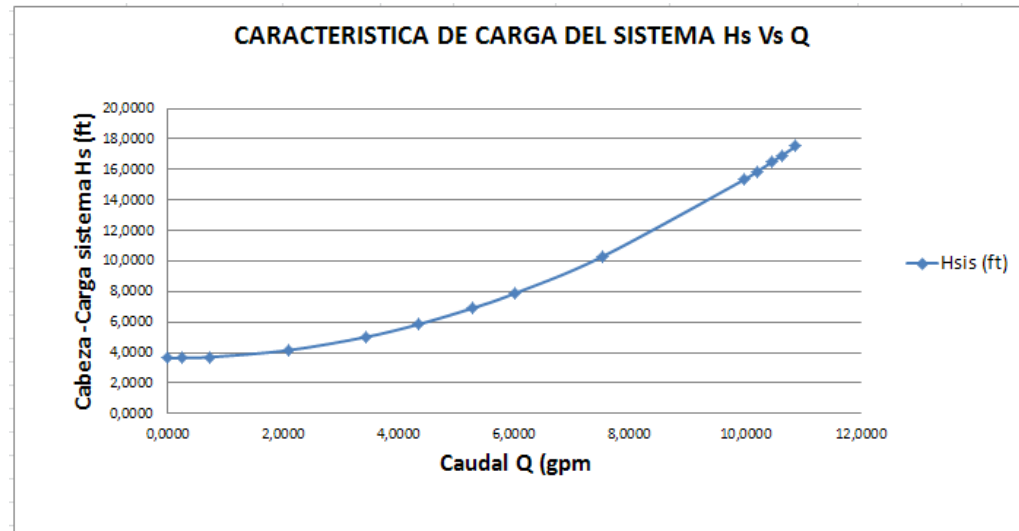
Caudal Q (m ³ /s)	Caudal Q (gpm)	H sistema (m)	H bomb (m)	H sistema (ft)	H bomba (ft)
0,000000	0,0000	1,1100	17,4503	3,6417	57,2517
0,000016	0,2528	1,1123	17,4434	3,6492	57,2290
0,000046	0,7321	1,1292	17,3921	3,7047	57,0608
0,000132	2,0911	1,2665	16,9755	4,1553	55,6939
0,000217	3,4350	1,5324	16,1691	5,0275	53,0484
0,000274	4,3486	1,7870	15,3969	5,8628	50,5149
0,000332	5,2702	2,1043	14,4344	6,9039	47,3569
0,000380	6,0193	2,4071	13,5161	7,8972	44,3442
0,000474	7,5175	3,1331	11,3138	10,2792	37,1189
0,000629	9,9724	4,6701	6,6517	15,3220	21,8233
0,000644	10,2064	4,8392	6,1390	15,8765	20,1412
0,000660	10,4655	5,0309	5,5574	16,5056	18,2331
0,000671	10,6383	5,1615	5,1615	16,9339	16,9339
0,000686	10,8712	5,3408	4,6175	17,5223	15,1493

Fuente: El Autor

En la tabla 2 la tercera columna es H del sistema en metros, luego se aplica el factor de conversión para expresarlo en pies (ft) que es la quinta columna y esta

se toma para la gráfica con la columna del Q en gpm., en la figura 11 se muestra la característica del sistema real del banco de prueba

Figura 11. Característica de carga del sistema hidráulico del banco de prueba



Fuente: El autor

5.6.2.3 Característica de carga de la bomba. Ahora se procede a determinar la característica de carga de la bomba. Para esto se tiene en cuenta la ecuación de la característica de la bomba:

$$H_b = a - cQ^2 \quad (35)$$

Cuando no se dispone de la característica de la bomba, se tiene en cuenta la ecuación anterior y el valor de la carga estática de la bomba se calcula partiendo de la ecuación de conservación de la energía y solo se tiene en cuenta la parte del delta de presiones, ya que únicamente se analiza la bomba, por lo cual el delta de Z es cero, al igual que el delta de velocidades por tener el mismo diámetro la tubería de succión y descarga y las pérdidas de presión externas a la bomba también vale cero, entonces

$$H_b = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (36)$$

Para la presión estática $Q = 0$, entonces

$$H_b = a, \quad \text{entonces } a = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (37)$$

En el anexo F, en la zona de *determinación de la característica de carga de la bomba*, se muestra los datos para el cálculo de a y c de la ecuación característica de la bomba.

ΔP = Presión Descarga - presión de succión esta en psi

Presión de descarga = 24,5 psi

Presión de succión = - 0,245 psi (de vacío)

$$\gamma = 9777 \text{ N/m}^3$$

Para obtener a en metros se debe multiplicar por el factor 6894.8

Entonces calculando en Excel se tiene:

$$a = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{24.5 - 0.245}{9777} * 6894.8 = 17.4503 \text{ metros} \quad (38)$$

Para determinar c se tiene en cuenta un punto de operación como el indicado en la figura 19 del marco teórico, anexo A, es el intersección entre la característica de carga de la bomba que es la buscada y la característica de carga del sistema que ya es conocida, este punto será (Q_{op}, H_{op}) , entonces se tiene

$$H_b = H_{op} = a - cQ_{op}^2 \quad (39)$$

Entonces

$$c = \frac{a - H_{op}}{Q_{op}^2} \quad (40)$$

Se conocen a , H_{op} y Q_{op} , entonces se determina c con Excel teniendo en cuenta las unidades correspondientes sabiendo que el producto cQ_{op}^2 debe dar en metros, entonces

$$c = \frac{a - H_{op}}{Q_{op}^2} \quad (41)$$

$$H_{op} = 5.1615 \text{ metros}$$

$a = 17.4503$ metros

$$Q_{op} = 0.00067117 \frac{m^3}{seg}$$

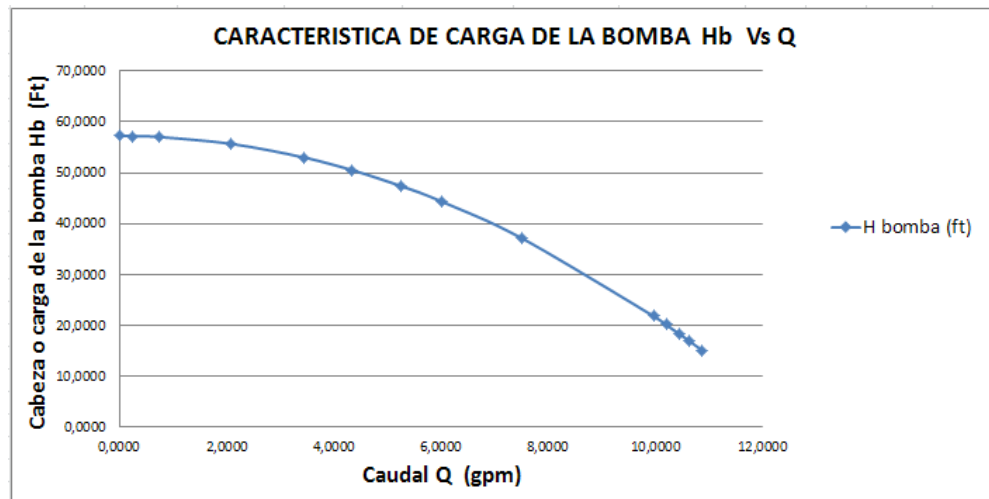
$$c = \frac{a - H_{op}}{Q_{op}^2} = \frac{17.4503m - 5.1615m}{(0.00067117 \frac{m^3}{seg})^2} = 27280125.7853 \frac{seg^2}{m^5} \quad (42)$$

En Excel la ecuación de la característica de carga de la bomba queda como

$$H_b = a - cQ^2 \rightarrow H_b = 17.4503 - 27280125.7853Q^2 \quad [m] \quad (43)$$

Para expresar la ecuación en pies, en Excel se utiliza el factor de conversión correspondiente.

Figura 12. Característica de carga de la bomba del banco de prueba

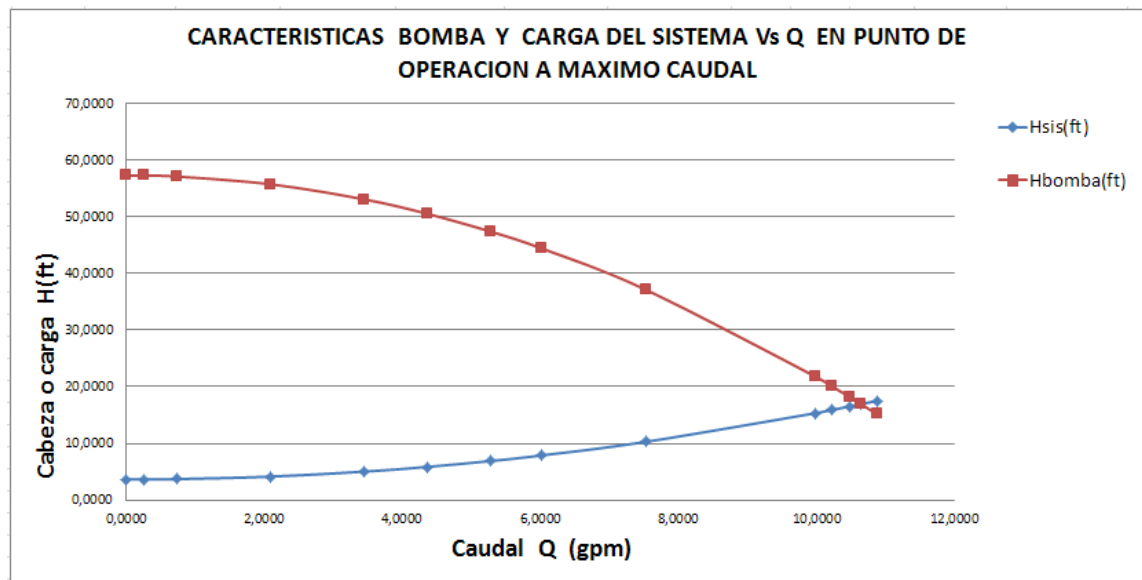


Fuente: El autor

Como se indicó anteriormente, en la tabla 2 se muestra la tabla construida en la herramienta en Excel para velocidad constante, anexo F para realizar la característica de carga de la bomba así como la de la carga del sistema ya mostrada. En la figura 12 se muestra la característica de carga de la bomba.

En la figura 13 se muestra el punto de operación de la bomba a velocidad constante (sin variador de velocidad), esto es, el cruce de la característica de carga de la bomba con la característica de carga del sistema, con la válvula de estrangulación totalmente abierta, la que está ubicada en la descarga de la bomba. Por estar totalmente abierta la válvula de estrangulamiento y a velocidad constante la bomba, su velocidad base en esta condición se logra el máximo caudal.

Figura 13. Características de carga de bomba y carga de sistema Vs Caudal Q



Fuente: El autor

5.6.2.4 Potencia útil de la bomba a velocidad constante. Siguiendo el modelo, como ya se conoce el comportamiento de la bomba y de la carga del sistema, se procede a calcular la potencia útil de la bomba para cada valor de caudal Q y carga de la bomba Hb. Se tiene que

$$P_{util} = \gamma Q H_b \quad (44)$$

Esta potencia útil es la potencia hidráulica a la salida de la bomba que corresponde a la potencia en cada punto de operación (Qop., Hop.) del intercepto de las características de la bomba, y de la carga del sistema que está variando mediante la válvula de estrangulamiento, a mayor apertura de la válvula mayor caudal. La última fila de la tabla de determinación de potencia útil de la bomba en el anexo F, corresponde a la válvula completamente abierta. La potencia útil se puede expresar en W o en Hp, teniendo en cuenta los factores de conversión.

Aplicando la fórmula del modelo, el peso específico está en N/m^3 , el caudal Q está en m^3/seg y la cabeza de la bomba H_b en metros, por lo cual para un Q de $0.000671 m^3/seg$ (10.6383 gpm), la potencia útil es:

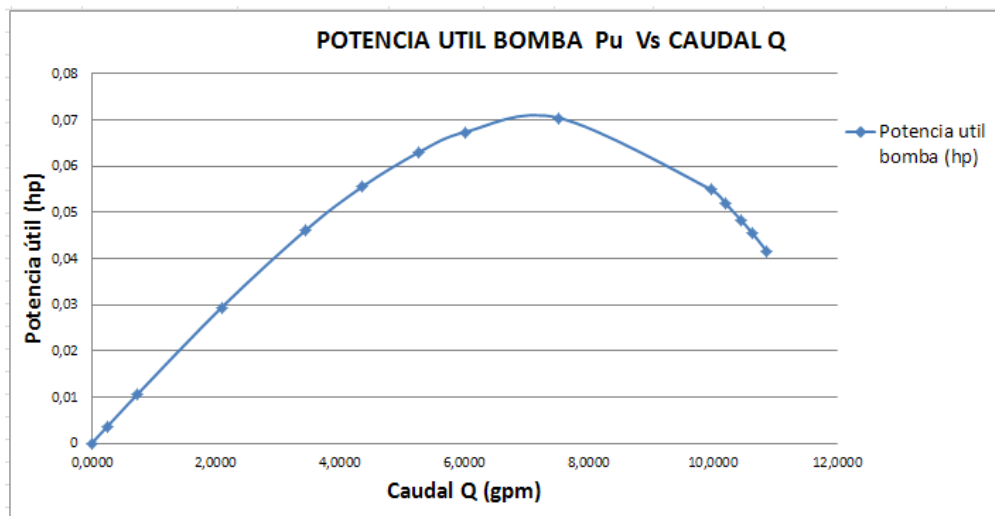
$$P_{util} = \gamma Q H_b = 9777 N/m^3 * 0.000671 m^3/seg * 5.1615 m = 33.8697 w \quad (45)$$

Para expresar la potencia útil en Hp se tiene:

$$P_{util} = HHP = \frac{QH_b SG}{3960} = \frac{10.6383 gpm * 16.9339 ft * 1}{3960} = 0.0455 hp \quad (46)$$

Ya construida toda la tabla se puede representar la característica de potencia útil versus caudal a velocidad constante como se muestra en la figura 14

Figura 14. Característica de potencia útil P_u Vs caudal Q



Fuente: El autor

5.6.2.5 Potencia al freno de la Bomba – Potencia en el eje. Siguiendo el modelo, ahora se debe calcular la potencia al freno de la bomba o potencia en el eje, BHP en el sistema inglés. Esta potencia para efectos del montaje se mide en forma directa mediante la balanza y el brazo torsor que se construyó junto con el extensor del estator del motor como se muestra en la figura 15.

En el modelo se indica los cálculos para la medición de par. , El brazo torsor se construyó mediante un esparrago de hierro de diámetro 3/8" cuya longitud útil es de 0,22 metros y la balanza tiene una capacidad de 1000 gramos. La balanza es electrónica tiene un diferencial de 2 gramos, mide cada 2 gramos y mide solamente números pares. Se verificó la medición de la balanza mediante pesos patronados del laboratorio y se construyó cuadro con los resultados obtenidos. Con base en el diferencial de la balanza se hace el ajuste a las mediciones que aparecen en las tablas de Excel.

Aplicando la ecuación de potencia en el eje para el punto de referencia seleccionado, Q de 0.00067 m³/seg (10.6383 gpm), se tiene:

$$T = F * d \quad (47)$$

Donde:

T = Par motor (grms-m),

F = fuerza (gramos),

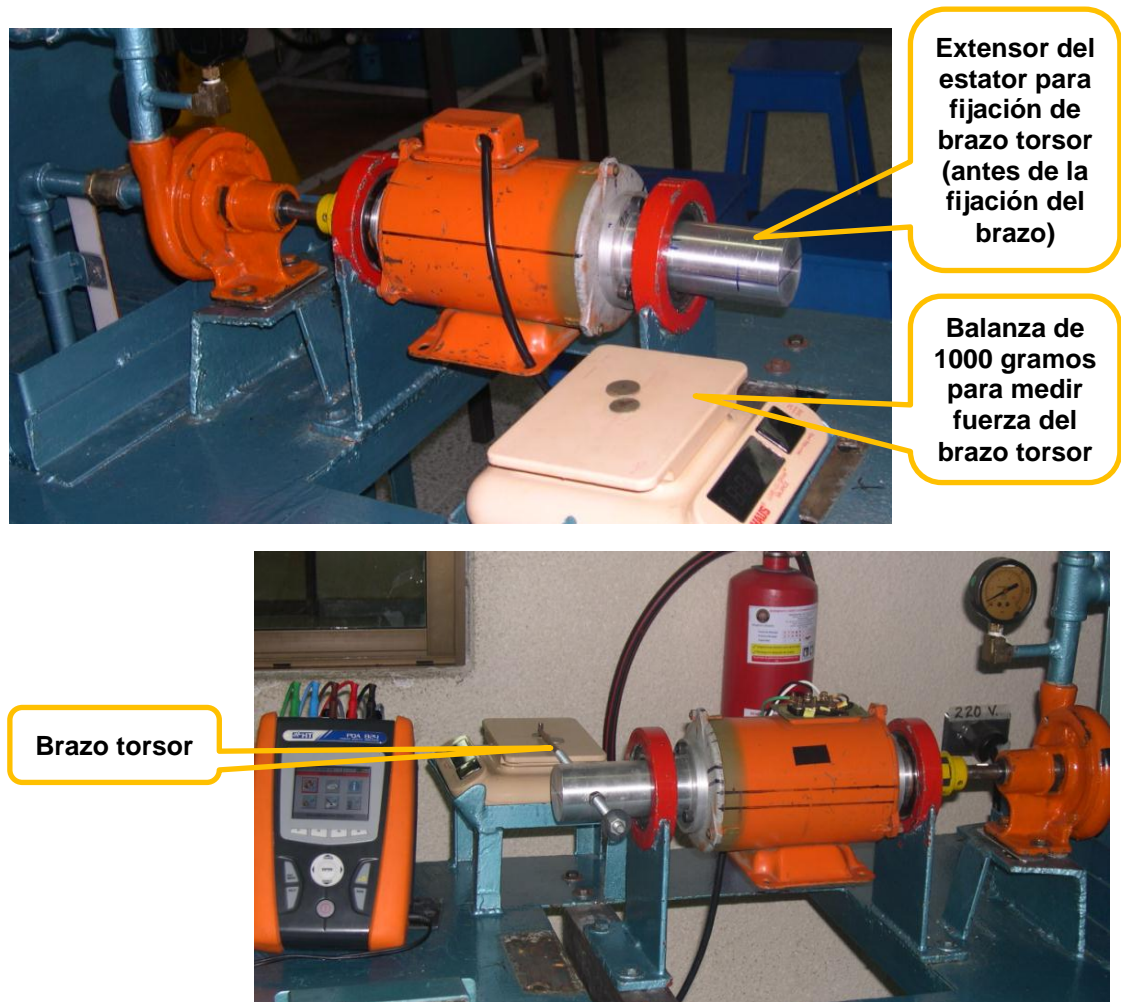
d = distancia útil brazo torsor (metros), entonces

$$T = F * d = 404 \text{ grms} * 0,222 \text{ mts} = 89,6880 \text{ grms} - \text{mts} \quad (48)$$

Ahora hallando la potencia en el eje para ese punto con 3540 rpm se tiene

$$Peje = \frac{T * n * 746}{1000 * 726} = \frac{89,6880 \text{ grms} - \text{mts} * 3540 \text{ rpm} * 746}{1000 * 726} = 326,2420 \text{ W} \quad (49)$$

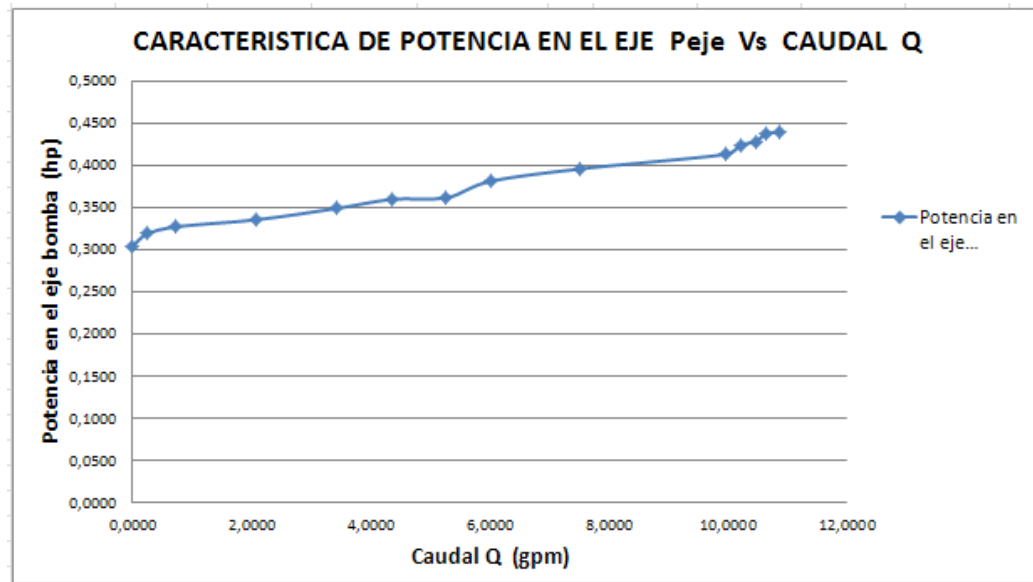
Figura 15. Sistema extensor de estator construido para medir par motor mediante brazo torsor y balanza.



Fuente: El autor

De esa manera en la herramienta en Excel Anexo F, se calcula la potencia en el eje, se completa la tabla correspondiente y grafica la característica de Potencia en el eje respecto al caudal como se muestra en la figura 16.

Figura 16. Característica de potencia en el eje - potencia al freno Vs. Caudal Q.



Fuente: El autor

5.6.2.6 Eficiencia de la bomba. Siguiendo el modelo o secuencia de pasos y ya conocidas las potencias a la salida (útil) y entrada (eje) de la bomba, ahora se calcula la eficiencia de la misma mediante la ecuación:

$$\eta_b = \frac{P_{util}}{P_{eje}} \quad (50)$$

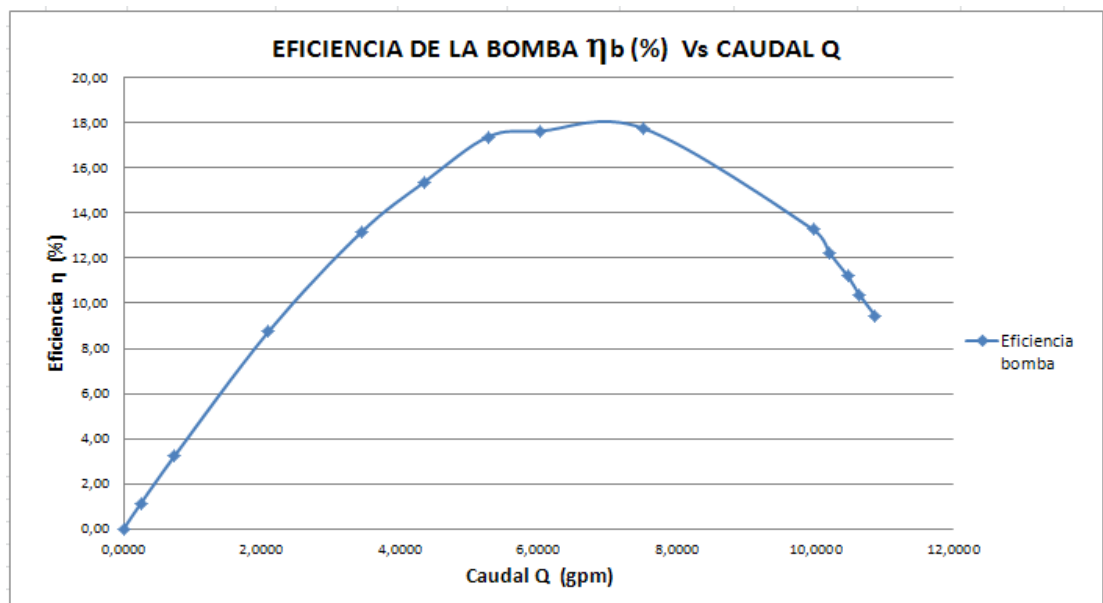
En el anexo F de la herramienta en Excel, se muestra que en la misma tabla donde se calcularon las potencias útil y en el eje de la bomba, se calcula la eficiencia de la misma para cada uno de los caudales ya sea con las potencias en vatios o en hp. Aplicando para el caudal que se ha tomado como referencia en los demás cálculos Q de 0.00067 m³/seg (10.6383 gpm) se tiene:

$$\eta_b = \frac{P_{util}}{P_{eje}} = \frac{33,8697 \text{ W}}{328,1349 \text{ W}} * 100 = \frac{0,0455 \text{ hp}}{0,4372 \text{ hp}} * 100 = 10,38 \% \quad (51)$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, la máxima eficiencia de la bomba fue 18.12% con un caudal de 7, 5175 gpm. Con base en la tabla se grafica la característica de eficiencia correspondiente, que se muestra en la figura 17.

Para tener una visión en conjunto de las características energéticas de la bomba estudiadas hasta ahora, se construyen en la herramienta en Excel en el anexo F, las gráficas que se muestra en las figuras 19 y 20.

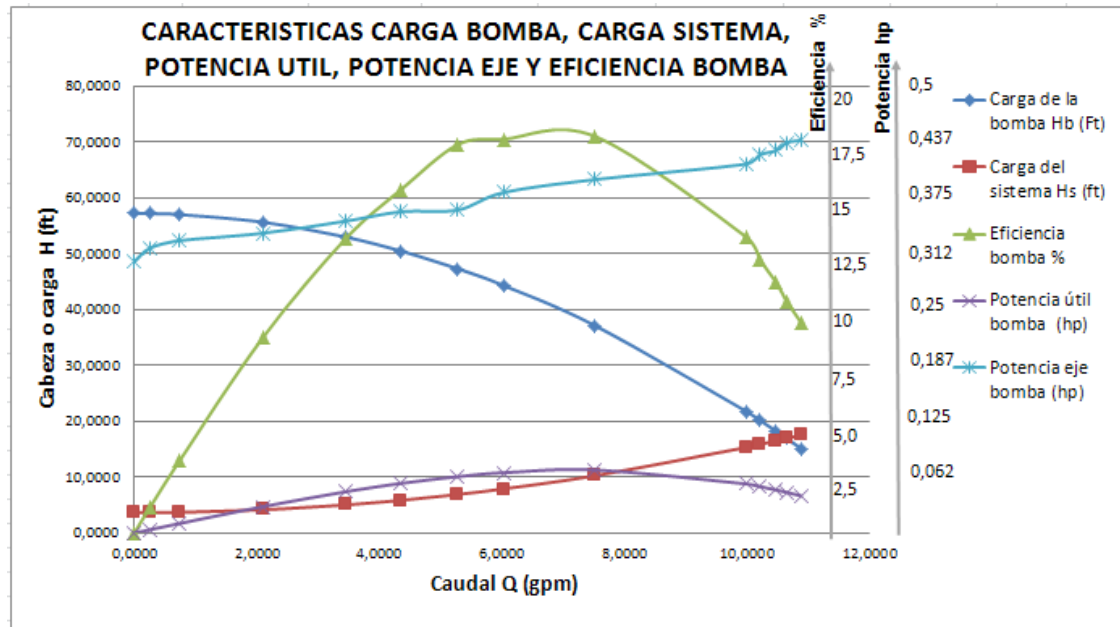
Figura 17. Característica de eficiencia de la bomba Vs caudal



Fuente El autor

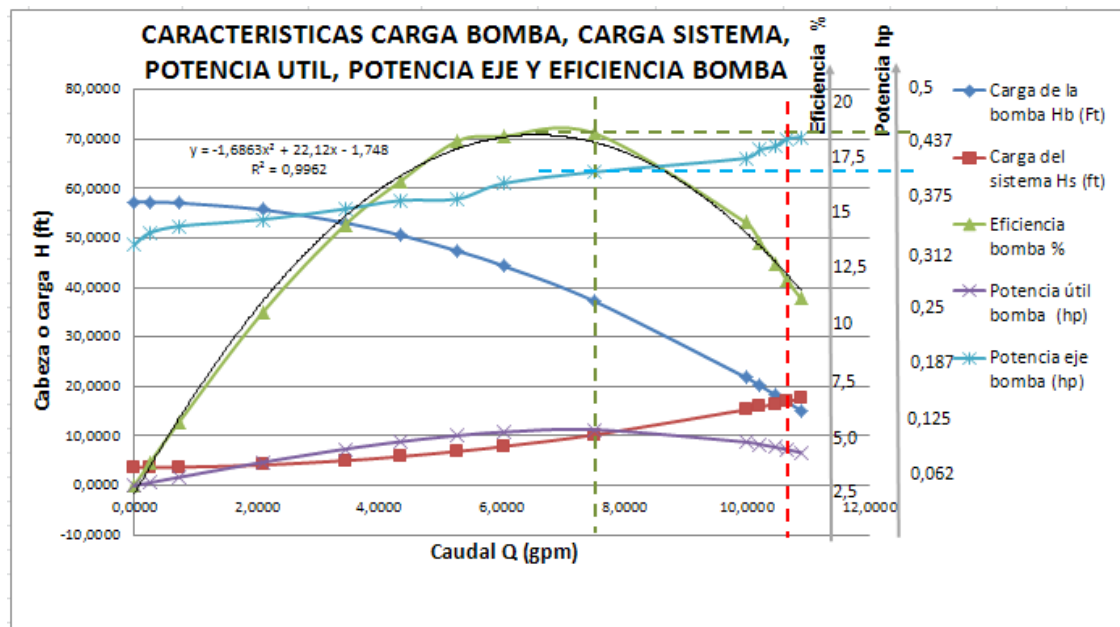
5.6.2.7 Rango y punto de mayor eficiencia de la bomba. De la figura 18 se observan las diferencias en magnitudes de cada uno de los parámetros. En la gráfica 19 se ha agregado por Excel la curva de tendencia para ver más claro el comportamiento. El rango de máxima eficiencia de la bomba, está entre 6 a 8 gpm que contiene el punto de máximo caudal en 7,51 gpm.

Figura 18. Características de carga bomba, carga sistema, potencia útil bomba, potencia en el eje bomba o potencia al freno y eficiencia bomba – comparativo



Fuente: El autor

Figura 19. Característica de eficiencia de la bomba ajustada en Excel



Fuente: El autor

.A partir de este punto comienza a disminuir la potencia útil, como consecuencia de la caída en la característica de carga de la bomba. Mientras que la potencia al freno no cae, al contrario aumenta, para poder alimentar la potencia de pérdidas en la bomba, las cuales aumentan con el caudal.

5.6.2.8 Requerimiento de potencia del motor en función del caudal de la bomba. De la figura 19, también se puede inferir que potencia de motor se requiere para alimentar la bomba en función del comportamiento del caudal. Se observa con líneas punteadas que para la máxima eficiencia de la bomba la Potencia requerida en el eje es de 0,3958 hp equivalente a 295, 26 W, sin embargo la bomba para llegar a su punto de operación de mayor caudal requiere una potencia de 0,4397 hp equivalente a 328,01 W, mayor para ese caudal y para alimentar las perdidas en ese punto que son mayores a menor eficiencia.

Teniendo en cuenta la potencia que pide la bomba en su eje en el punto de operación de máximo caudal (cuando la válvula de estrangulamiento está totalmente abierta), y partiendo del hecho que el factor de servicio del motor es 1, se puede tomar un factor de seguridad para la potencia del motor del 10%, esto daría una potencia de 0,4836 hp equivalente a 360, 81 W. Con base en los valores comerciales del mercado la potencia de motor sería de 0,5 hp frente a 1,2 hp del actualmente usado, es decir se está usando tan solo el 40, 3 % de la potencia del motor instalado.

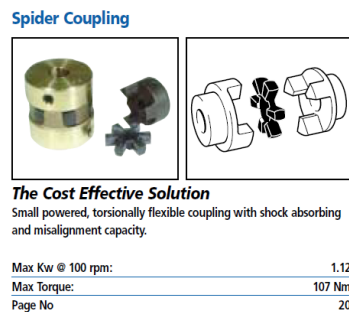
Se debe resaltar que el motor no estará más cargado que el punto de operación a máximo caudal, porque es lo máximo que el sistema pide y la bomba se acomoda a este requerimiento máximo. Se observa como las gráficas permiten hacer el diagnóstico de los componentes del sistema.

5.6.2.9 Eficiencia del acople motor bomba. Se emplea un acople tipo rígido con araña de caucho común para bajas potencias, ver figura 20. En la figura 21 se presenta el dibujo y un cuadro con especificaciones del acople flexible L75. Para el acople se debe cumplir:

$$T = \frac{0,8952 \text{ KW} * 1,8 * 100}{3543} = 0,04548 [N - m] \quad (52)$$

De la tabla 3, el acople L75 corresponde a la referencia RSC70, la potencia del acople es de 2hp para un motor de 3600 rpm para agujero de ¾ “. El motor utilizado en el banco de prueba es de 1,2 hp, 2 polos 3600 rpm. eje ¾

Figura 20, Acople flexible tipo araña



Fuente: [27] RENOLD Couplings, Resilient and soft start Couplings 4th edition. Renold Power Transmission Ltd. Ref 2000/ENG/ 02.02. p 08.

Figura 21. Acople flexible de cruceta (o tipo araña)

H.P. M.	Ref.	L75	L90	L95	L99	L100	L125	L150	L190	L225
100 H.P.	0.1	0.3	0.4	0.5	0.8	1.0	1.5	2.5	4.0	
600 H.P.	0.4	0.8	1.2	1.8	2.7	4.5	7.5	11.0	15.0	
1.200 H.P.	0.7	1.4	2.2	3.5	5.0	8.5	15.0	22.0	30.0	
1.800 H.P.	1.0	2.0	3.0	5.0	7.5	12.0	20.0	30.0	40.0	
2.400 H.P.	1.3	2.7	4.0	6.4	9.5	15.0	24.0	37.0	50.0	
3.600 H.P.	2.0	4.0	5.4	7.5	11.0	19.0	30.0	45.0	60.0	
Máxima Orificio	3/4"	7/8"	1"	1 1/3"	1 1/4"	1 1/2"	1 5/8"	2"	2 1/4"	
Diámetro Manzana	35	40	48	50	58	68	80	96	108	
Diámetro mayor cruceta	45	53	53	63	63	78	94	110	125	
Large total Acople	53	60	68	70	82	94	108	125	135	
Peso Aprox. Kilos	.4	.6	.8	1.2	1.5	2.5	4.	6.5	9	

Fuente: Proveedor original del acople

El par del acople RSC70 a 100 rpm equivale a 32 N-m, a 3543 rpm, que es la velocidad del motor en prueba, corresponde a un par de 0,9031 N-m.

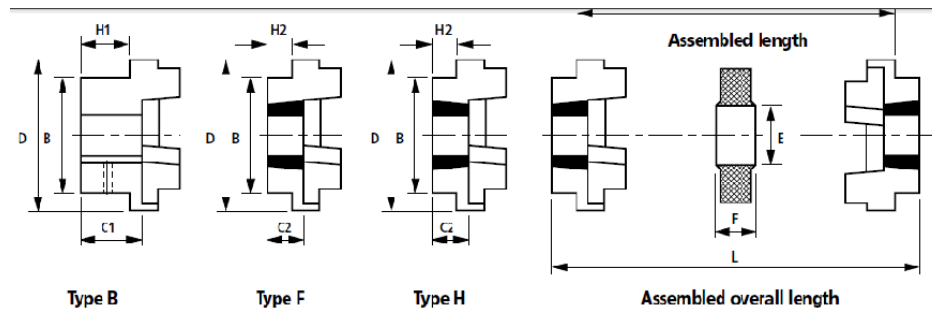
Lo anterior permite confirmar que el acople utilizado cumple los requerimientos de potencia y de par establecidos con un factor de seguridad por encima del utilizado en la fórmula de par, con lo cual se espera que haya máxima transferencia de potencia del motor a la bomba.

Se logró un buen montaje en cuanto a alineamiento axial, lateral y angular, el movimiento está libre de vibración, pero se sabe que no es un acople perfecto o ideal, por lo cual tomando como base lo analizado y lo presentado por [30] se toma para este tipo de acople una eficiencia del 98%. Para determinar una eficiencia diferente a éste valor de 98%, la investigación no tiene la información, ni se dispone de fórmulas consistentes que permitan hacerlo con exactitud.

Existe una forma empírica para poder medir la potencia disipada o pérdidas en el acople, que consiste en medir mediante un calorímetro, el calor producido por las posibles fricciones o pérdidas ocasionadas en el acople, pero este calorímetro habría que fabricarlo a la medida y consiste en un recinto cerrado preferiblemente en icopor, poliuretano u otro material adiabático, el cual cubriría completamente el acople sería una especie de caja hermética y tendría un orificio de entrada y salida muy preciso para los ejes respectivos a cada lado del acople y un medidor de temperatura para medir el calor dentro de la caja que representaría las pérdidas del acople.

Se podría implementar en un laboratorio, pero requiere mucha precisión en la fabricación, además de existir varias fugas como los mismos ejes, los que disiparían calor, lo que requeriría contemplar otros factores complicados de controlar fácilmente. Este puede ser a futuro, parte de otro proyecto de investigación derivado del presente.

Tabla 3. Características acoples flexibles tipo araña.



Coupling Size	Power /100rpm Kw	Torque Nominal Nm	Speed Max rpm	Type B		Type F & H			Max. Misalignment		End Float mm
				Bore Dia		Bush Size	Bore		Offset mm	Angular deg	
				Max	Min		Max	Min			
RSC70 ###	0.33	32	7700	32	0	TB1008	25	9	0.3	0.5	+2
RSC90 ###	0.84	80	6300	42	0	TB1108	28	9	0.3	0.5	+5
RSC110 ###	1.68	160	5000	55	0	TB1610	42	14	0.3	1	+6
RSC130 ###	3.30	315	4100	60	0	TB1610	42	14	0.4	1	+8
RSC150 ###	6.28	600	3600	70	0	TB2012	50	14	0.4	1.5	+9
RSC180 ###	9.95	950	3000	80	0	TB2517	65	16	0.4	1.5	+1.1
RSC230 ###	21	2000	2600	100	48	TB3020	75	25	0.5	2	+1.3
RSC280 ###	33	3150	2200	115	60	TB3525	90	35	0.5	2.5	+1.7

Fuente: [27] RENOLD Couplings, Resilient and soft start Couplings 4th edition. Renold Power Transmission Ltd. Ref 2000/ENG/ 02.02. p 08.

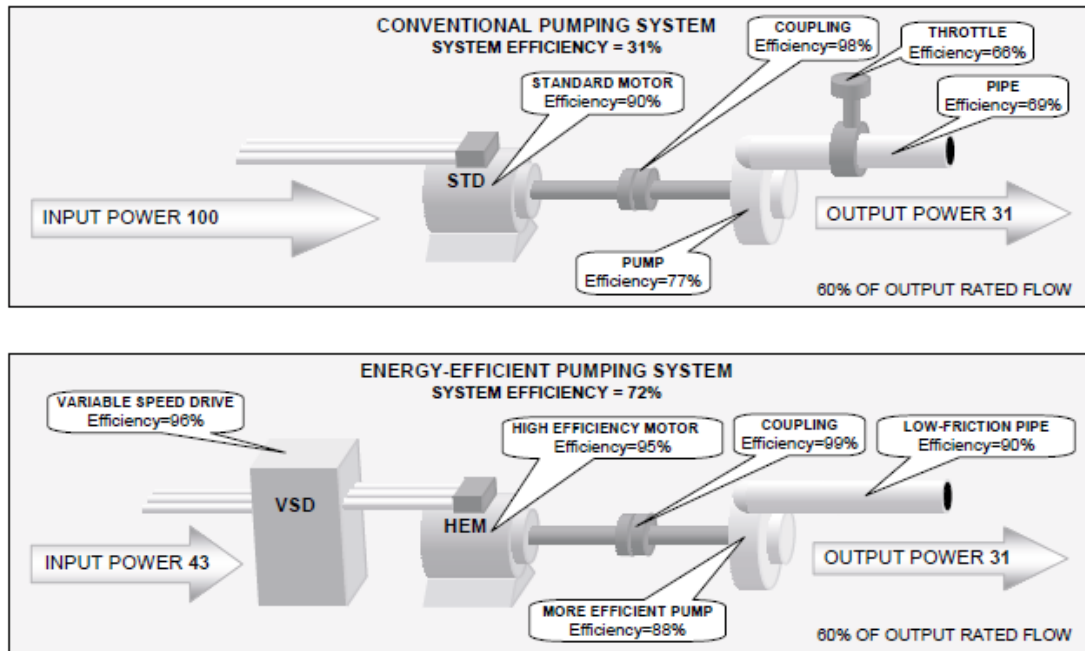
Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores y lo mostrado por [30] en su investigación, que se indica en la figura 22, se determina tomar como eficiencia para el tipo de acople utilizado, que está catalogado como acople flexible por el material, pero sus principales características aplican a los acoples rígidos:

$$\eta_{acople} = 0,98\% \quad (53)$$

Para los casos de acoples de alta eficiencia del mismo tipo se puede tomar, como se muestra en la misma figura 22

$$\eta_{acople} = 0,99\% \quad (54)$$

Figura 22. Eficiencias de un sistema de bombeo convencional Vs. de alta eficiencia



Fuente: [30] Energy Efficient motor Driven. European Copper Institute. KU. Leuven and University of Coimbra.2004. [Consultado 2 de julio 2012], Disponible en internet:<http://www.copperinfo.co.uk/motors/downloads/pub-176-energy-efficient-motor-driven-systems.pdf>.

Este valor tomado del 98 %, es un buen valor y podría ser más alta la eficiencia del acople, teniendo en cuenta que investigaciones hechas con acoples tipo cadena donde hay mucha más fricción, indican eficiencias del acople del 95 %

5.6.2.10 Pérdidas del motor. Para determinar las pérdidas del motor se utiliza el método de separación de pérdidas presentado en el marco teórico anexo A. Se siguen los lineamientos de la norma IEC 60034-2-1: 2007. [38] ROTATING ELECTRICAL MACHINES. Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests.

Siguiendo el modelo y aplicándolo en la herramienta en Excel se tiene:

5.6.2.10.1 Pérdidas en el cobre. Se hallan con la ecuación:

$$P_{cue} = 3 * R_f * I_f^2 \quad (55)$$

Para hallar la resistencia por fase del motor, se tiene en cuenta su conexión, doble estrella paralelo, como se muestra en la figura 23. Se toman las mediciones de resistencia de línea con un miliohmimetro digital, por catálogo para el rango de 20 .00 Ω tiene una resolución de 0.01 Ω y una precisión de $\pm 0.5\%$ + 02 dígitos.

Se han medido los valores de resistencia en cada devanado y entre líneas:

$$R_{12} = 4,6100 \Omega$$

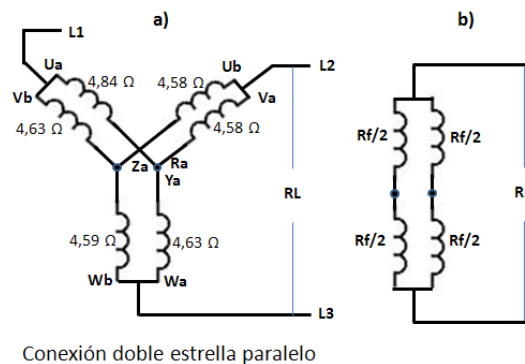
$$R_{23} = 4,6700 \Omega$$

$$R_{13} = 4.6800 \Omega$$

El valor que pide la fórmula es valor de resistencia de fase, Como se muestra en la figura 24 b) entre dos líneas de la conexión trifásica se tienen dos series de resistencias, cada una de $R_f/2$, por lo cual para obtener éste valor en función del valor de resistencia en línea se tiene:

$$R_L = \frac{\frac{2R_f}{2} * \frac{2R_f}{2}}{\frac{2R_f}{2} + \frac{2R_f}{2}} = \frac{\frac{4R_f^2}{2}}{\frac{4R_f}{2}} = R_f \quad (56)$$

Figura 23. Conexión motor banco de prueba y medidas resistencias devanados.



Fuente: El autor

Por lo tanto

$$R_L = R_f \quad (57)$$

Como los valores leídos fueron de resistencia de línea, estos son los mismos de resistencia de fase. De acuerdo a norma se debe tomar el valor promedio:

$$\left. \begin{array}{l} R_{12} = 4,6100 \, \Omega \\ R_{23} = 4,6700 \, \Omega \\ R_{13} = 4,6800 \, \Omega \end{array} \right\} R_f \text{ promedio} = 4,6533$$

De acuerdo a norma, el valor de la resistencia se debe corregir por efecto de la temperatura, el factor de corrección está dado por:

$$K_\theta = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w} \quad (58)$$

Donde:

K_θ = Factor de corrección de temperatura para el bobinado.

θ_c = Es la entrada de temperatura de enfriamiento durante la prueba, es la diferencia entre 25 °C normalizada y la temperatura ambiente durante la prueba.

θ_w = Es la temperatura del devanado (motor) medida de acuerdo a norma, ver Anexo A en el que se muestra el cuadro de mediciones donde aparece las temperaturas del motor registradas para cada punto de operación. Para el caso se midió con High temperatura InfraRed Thermometer with laser Pointer Model 42545A que tiene una escala de -50 a 1000°C y una resolución de 0,1°C/F sobre toda la escala y una precisión de $\pm (2\% \text{ de la lectura} + 4^\circ\text{F}/2^\circ\text{C}) -1^\circ\text{C}$ a 426°C.

En la herramienta en Excel, Anexo F, en la zona de *determinación de las características de eficiencia del motor por separación de pérdidas y por medición directa*, se muestra la tabla para calcular las pérdidas en el cobre del estator, así como las tablas para la determinación de las demás pérdidas del mismo.

Se muestra la columna de la corriente de fase del motor que está conectado en Y, se trabaja con los valores de corriente de fase promedio. Tener en cuenta que la

columna verde corresponde a la información que el usuario alimenta con los datos de las mediciones

Como ejemplo, para el mismo Q que se ha trabajado en los casos anteriores, Q de 0.00067 m³/seg que equivales a 10.6383 gpm se tiene:

$$R_f \text{ promedio} = 4,6533$$

Factor de corrección de temperatura para el bobinado K_θ :

$$K_\theta = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w} = \frac{235 + 46,5 + 25 - (25 - 24)}{235 + 46,5} = 1,0853 \quad (59)$$

$$R_f \text{ corregida} = 4,6533\Omega * 1,0853 = 5,0592\Omega \quad (60)$$

La corriente de fase promedio es 1,9490 A., remplazando en la ecuación de pérdidas en el cobre se tiene:

$$P_{cuc} = 3 * R_f * I_f^2 = 3 * 5,0592 * 1,9490^2 = 57,5469 W \quad (61)$$

De la misma forma se obtienen todos los valores de pérdidas en el cobre para los diferentes puntos de operación. Al final de la tabla se ha calculado teóricamente las pérdidas que se causarían si el motor trabajara a full carga con la corriente nominal de placa, pero esto no se dará porque el motor esta subcargado al 40.3%.

5.6.2.10.2 Pérdidas en el hierro y perdidas mecánicas. Utilizando el método E de IEEE 112 2004 modificado por Ontario Hydro, estas pérdidas son 3,5 a 4,2 % de la potencia de entrada nominal P_i , por lo tanto

$$P_{fe} + P_{fw} = (3,5 - 4,2\%)P_i \quad (62)$$

Para efectos de los cálculos se toma 3,5% como factor de pérdidas ya que es un motor muy pequeño y se aplica en todos los puntos de operación la potencia

nominal, por eso aparece el mismo valor de pérdidas en todos los puntos. Sin embargo a nivel de pruebas, para efectos de comparación, como en la columna verde se ha registrado por parte del usuario la potencia de entrada medida, se calculan las pérdidas con estos valores, más no se registran, dan resultados muy inferiores a los calculados con la potencia nominal y se utilizan para al final de la medición de pérdidas, hacer el análisis correspondiente.

Los datos de placa del motor son:

Motor tipo: ILA3

Modelo: 0,80-2 YB 60

Modelo: 0,80-2 YB 60

Tamaño: 80

Forma constructiva: B3

IP 44

CI Rotor: 16

Potencia salida: 1.2 hp

Clase de Aislamiento: B

Voltaje: 220 YY/440Y Volts.

Corriente: 4.0/2.0 A

Cosφ: 0.77

Frecuencia: 60 Ciclos/seg

Velocidad nominal: 3400 rpm

Con base en los datos de placa (nominales), se calcula la potencia consumida:

$$P_{entrada} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos\varphi = \sqrt{3} * 220 * 4 * 0.77 = 1173.63 \text{ W} \quad (63)$$

El rendimiento teórico de acuerdo a datos de placa sería:

$$\eta_{teorico \text{ Motor}} = \frac{P_{sal}}{P_{entrada}} * 100 = \frac{1.2 * 746}{1173.63} * 100 = \frac{895.20}{1173.63} * 100 = 76.27 \% \quad (64)$$

Como ejemplo de aplicación con factor de pérdidas de 3.5%, en el punto Q de 0.00067 m³/seg, se obtiene:

$$P_{fe} + P_{fw} = 0.035 * 1173.63 = 41.0771 \text{ W} \quad (65)$$

5.6.2.10.3 Pérdidas adicionales en carga. Para el cálculo de las pérdidas adicionales, se aplica el criterio recomendado por IEEE 112 respecto al porcentaje de la potencia de salida de acuerdo a la tabla 2 mostrada en el numeral 1.2.13 del marco teórico en el anexo A. En la herramienta en Excel, en el anexo F, en la zona de las pérdidas del motor, se presenta la tabla construida para el cálculo de estas pérdidas.

Siguiendo el método, para las pérdidas adicionales se tiene:

$$P_{LL} = (K\%)P_n \quad (66)$$

Siendo P_n la potencia nominal de salida. De acuerdo a tabla 2, para P_n entre 1 a 125 hp, $K = 1.8 \%$, factor que aplica para el motor de prueba.

De acuerdo a placa, el motor es de 1.2 hp, equivalente a 895.2 W.

Aplicando el criterio, con el caudal de operación Q de 0.00067 m³/seg se tiene:

$$P_{LL} = (K\%)P_n = 0.018 * 895.2 = 16.1136 \text{ W} \quad (67)$$

Este valor se mantiene constante para todos los caudales como se muestra en el anexo F.

En la columna verde, se registran los valores calculados de potencia de salida para cada caudal, de acuerdo a las mediciones de par y velocidad. Como el motor está cargado al 40.3%, estos valores son muy inferiores a la potencia nominal, sin embargo se calculan las pérdidas correspondientes, para análisis en la comparación de los sistemas de medición de pérdidas.

5.6.2.10.4 Pérdidas en el cobre del rotor. Las pérdidas en el cobre del rotor son función del deslizamiento del motor y de la potencia que le llega al rotor, por lo tanto se cumple que::

$$P_{cur} = S * P_{agr} \quad (68)$$

Se requiere calcular el deslizamiento para cada punto de operación mediante:

$$S = \frac{n_{cg} - n_r}{n_{cg}} \quad (69)$$

También se requiere determinar la potencia que llega al rotor mediante:

$$P_{agr} = P_i - P_{cue} \quad (70)$$

Donde P_i es la potencia nominal de entrada. En la herramienta en Excel, en el anexo F, en la zona de pérdidas del motor, se muestra la tabla construida para calcular estas pérdidas. En la columna verde del usuario, la velocidad es constante, en cada columna se calcula lo correspondiente.

Como ejemplo y tomando el mismo punto de caudal Q de 0.00067 m³/seg se tiene:

Con base en la velocidad real medida y la velocidad de campo giratorio, calculamos el deslizamiento, para el caudal del ejemplo tenemos:

$$S = \frac{n_{cg} - n_r}{n_{cg}} = \frac{3600 - 3540}{3600} = 0.0167 \quad (71)$$

Luego se calcula la potencia que le llega al rotor, en función de la potencia nominal de entrada al motor y de las perdidas en el cobre del estator calculadas, entonces se obtiene:

$$P_{agr} = P_i - P_{cue} = 1173,63 - 57.5469 = 1116,09 \text{ W} \quad (72)$$

Ahora se puede calcular las perdidas en el cobre del rotor

$$P_{cur} = S * P_{agr} = 0.0167 * 1116,09 = 18,6014 \quad (73)$$

De esta manera se completa toda la tabla, como se indica en el anexo F.

Ahora ya se tienen calculadas todas las pérdidas del motor, se suman y se obtienen las pérdidas totales para cada caudal, cumpliendo lo dispuesto por el método de separación de pérdidas como se ilustra en el anexo F.

En el ejemplo, con Q de 0.00067 m³/seg, se suman todas las potencias calculadas y se obtiene:

$$P_{perd-tot\ motor} = P_{cue} + P_{pfe+pfw} + P_{LL} + P_{cur} = 57,5469 + 41,0771 + 16,1136 + 18,6014 = 133,3390\ W \quad (74)$$

Este dato a nivel de ejemplo, se utiliza para compararlo con el método directo..

5.6.2.10.5 Pérdidas del motor – Forma directa. Complementariamente se tiene la forma directa de hallar las pérdidas del motor mediante mediciones, Se mide la potencia de entrada para cada uno de los puntos de operación y como ya se tiene medida en cada punto la potencia de salida en el eje, la diferencia entre la potencia de entrada y de salida será la potencia de pérdidas en cada punto. En la herramienta en Excel, anexo F se observa el cálculo completo para todos los puntos de caudal. Debe mencionarse que a la medida de potencia en el eje del motor esa descontado la potencia de pérdidas en el acople, que es muy pequeña.

Como ejemplo tomando el mismo punto de caudal Q de 0.00067 m³/seg, se obtiene:

$$P_{perd-tot\ motor} = P_{i\ motor} - P_{salida\ motor} = 424,0908 - 326,2420 = 97,8561\ W \quad (75)$$

Con base en los resultados obtenidos de los dos métodos de determinación de las pérdidas y como se observa en el ejemplo aplicado en el informe:

$$P_{perd-tot\ motor-separac.perd} = 133,3390$$

$$P_{\text{perd-tot motor-medic.direc.}} = 97,8561$$

Las pérdidas por el método de separación de pérdidas son mayores que por medición directa, las primeras varían respecto a las segundas en 36,25%. El método más confiable es el directo, ya que depende de las mediciones realizadas, y se ha utilizado aparatos de medida de muy buenas especificaciones y en buen estado, mientras que el método de separación de perdidas es indirecto.

Como se indicó en cada tipo de pérdidas, se hizo un cálculo adicional, para fines de análisis, se calcularon las pérdidas, no con las potencias nominales de entrada y salida, como lo pide el método, sino con las reales de acuerdo a cada punto de operación, y se confrontó con los resultados obtenidos a potencias nominales y la variación fue muy baja, lo cual puede indicar que la gran diferencia presentada se debió a lo subcargado que estaba trabajando el motor. Mientras el motor trabaje más cerca de su potencia nominal menor podrá ser la variación. Por lo anterior, se podría pensar que cuando el motor este muy subcargado se deberán tomar, no las potencias nominales, sino las reales.

Otro aspecto a tener en cuenta es que el error debido a la variación entre los diferentes métodos de determinación de pérdidas del motor es mucho más apreciable para motores menores a 5 KW. Los métodos de cálculo de perdidas, presentan mayores errores a menores potencias.

Por ser más confiable el método directo, sus datos se tomarán como referente para los demás cálculos, sin embargo, se tendrá en cuenta que los resultados por el método de separación de perdidas deberán ser validados cuando no se pueda tener mediciones directas, y habrá que hacer los ajustes correspondientes con base en los resultados obtenidos.

5.6.2.11 Eficiencia del motor. Siguiendo el modelo, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se halla la eficiencia del motor por la fórmula directa o indirecta:

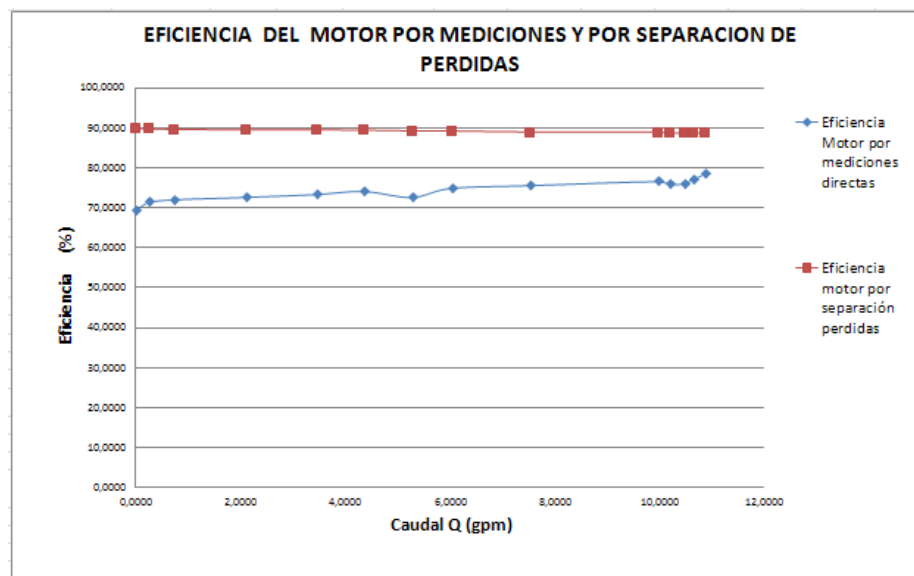
La forma directa
$$\eta_m(\%) = \frac{P_{sal}}{P_{in}} * 100 \quad (76)$$

Forma indirecta:
$$\eta_m(\%) = \left(1 - \frac{P_{perdidas}}{P_{in}}\right) * 100 \quad (77)$$

Se tiene toda la información para aplicar cualquiera de las dos fórmulas. Se aplican a los dos métodos para hacer el análisis comparativo. En la herramienta en Excel, anexo F, se muestran las tablas con los resultados respectivos.

En la figura 24 se muestran las características de eficiencia del motor obtenidas por cada método, siendo el método directo más confiable.

Figura 24. Curvas eficiencia motor por medición directa y separación pérdidas



Fuente: El autor

La eficiencia por el método de separación de pérdidas resulta mayor, aunque las pérdidas por este método son mayores, esto debido a que la relación se hace respecto a la potencia nominal de entrada.

En la tabla 18 se muestra la tabla que presenta [37], puede inferirse que los resultados obtenidos por el método de mediciones está dentro de lo esperado de acuerdo a [37]

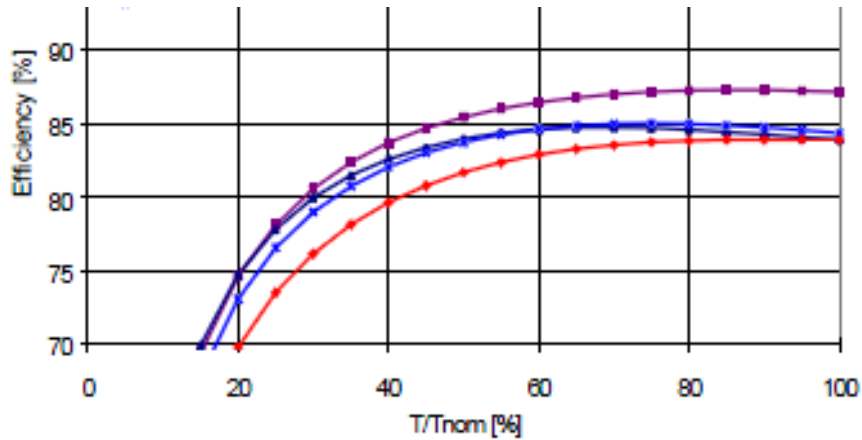
Tabla 4. Eficiencias motores de inducción clasificación B de acuerdo a NEMA

hp	Nominal efficiency range	Average nominal efficiency
1	68 – 78	73
1.5	68 – 80	75
2	72 – 81	77
3	74 – 83	80
5	78 – 85	82
7.5	80 – 87	84
10	81 – 88	85
15	83 – 89	86
20	84 – 89	87.5
25	85 – 90	88
30	86 – 90.5	88.5
40	87 – 91.5	89.5
50	88 – 92	90
60	88.5 – 92	90.5
75	89.5 – 92.5	91
100	90 – 93	91.5
125	90.5 – 93	92
150	91 – 93.5	92.5
200	91.5 – 94	93
250	91.5 – 94.5	93.5

Fuente: [37] Emady, Ali. Energy Efficient Electric Motors. Third Edition revised and expanded. 2005. 406 p. ISBN: 0-8247-5735-1

5.6.2.12 Rango y punto de mayor eficiencia de motor. La eficiencia del motor de inducción está en función del nivel de carga como se observa en la figura 25. El comportamiento lineal de las eficiencias del motor, de acuerdo a la figura 24, es acorde con el hecho de que esta subcargado al 40.3% (con factor de seguridad), por lo cual está en la zona lineal izquierda de la figura 26, por lo tanto para las condiciones dadas del montaje la mayor eficiencia se logra a los mayores caudales de prueba, o sea a la mayor carga del sistema.

Figura 25. Comportamiento de la característica de eficiencia en motores pequeños como función de la relación del par de carga respecto al par nominal



Fuente: [39] Determining the Efficiency of Induction Machines, Converters and Softstarters. 8 p. [Consultado 28 de Mayo, 2011]. Disponible en Internet: http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_164.pdf

En general, lo esperado para lograr mejores eficiencias del motor en pequeñas y medianas potencias con el motor bien seleccionado, es que esté cargado del orden del 75 al 80 % aproximadamente, como se muestra en la figura 25.

5.6.2.13 Pérdidas del Centro de Control de Motores o del Arrancador.

Siguiendo con el modelo, se determina las pérdidas del arrancador, ya que para la potencia utilizada el arrancador es suficiente, adicionalmente no hubo disponibilidad de un Centro de Control de motores. El arranque utilizado es arranque directo por el tamaño del sistema, adicionalmente todos los cálculos presentados en este trabajo aplican solo para este tipo de arranque. El arrancador es marca Siemens 3VE 1000 ZI 16 amperios.

Para hallar las pérdidas del arrancador se ha medido mediante el analizador de redes la potencia a la entrada del arrancador y a la salida del mismo, por lo cual la

diferencia de las dos potencias es la potencia de pérdidas del arrancador. En la herramienta en Excel, Anexo F en la zona *determinación eficiencia CCM o Arrancador* se muestra la tabla de Excel para calcular estas pérdidas.

En dicha tabla se muestran en verde los datos alimentados por el usuario, resultado de las mediciones en cada punto de operación. Como ejemplo del cálculo de las pérdidas, al caudal Q de $0.00067 \text{ m}^3/\text{seg}$ (10.6383 gpm), se tiene:

$$P_{\text{perd. arr.}} = P_{\text{entr.arr.}} - P_{\text{sal. arr.}} = 434,2786 - 430,3889 = 3,8897 \text{ W} \quad (78)$$

Se completa toda la tabla y se observa que las pérdidas en el arrancador son aproximadamente el 1% de la potencia de entrada al sistema.

5.6.2.14 Eficiencia del Centro de Control de Motores o arrancador. Con base en los resultados de la tabla *eficiencia del MCC*, anexo F, se halla la eficiencia del arrancador mostrada en la Figura 26. Esta se calcula por la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, que es la forma directa por las mediciones o por la forma indirecta con el cálculo de las pérdidas.

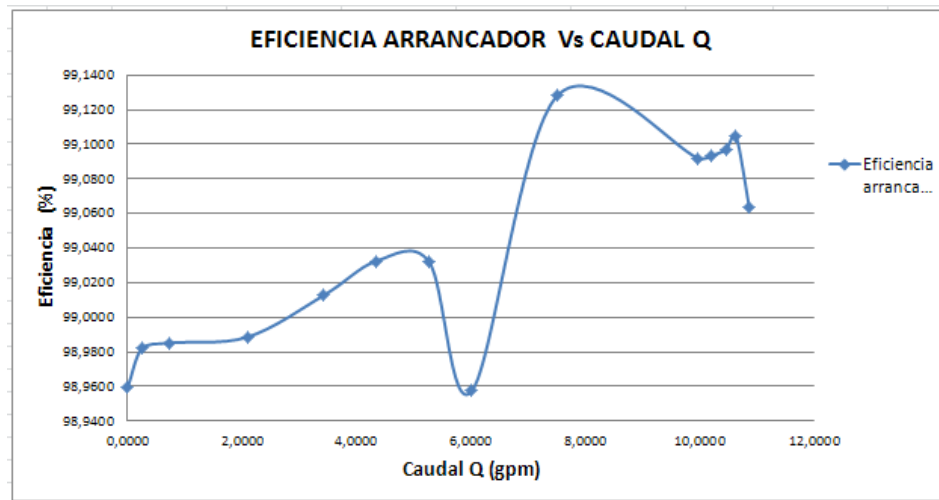
$$\eta_{\text{arr}}(\%) = \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{in}}} * 100 = \left(1 - \frac{P_{\text{perdidas}}}{P_{\text{in}}}\right) * 100 \quad (79)$$

Como ejemplo para el mismo caudal de prueba que se ha trabajado Q de $0.00067 \text{ m}^3/\text{seg}$ (10.6383 gpm), se tiene:

$$\eta_{\text{arr}}(\%) = \frac{430.3889}{434.2786} * 100 = 99.1043 \% \quad (80)$$

De la misma manera se completa toda la tabla

Figura 26. Curva Eficiencia del arrancador en función del Caudal Q



Fuente: El autor

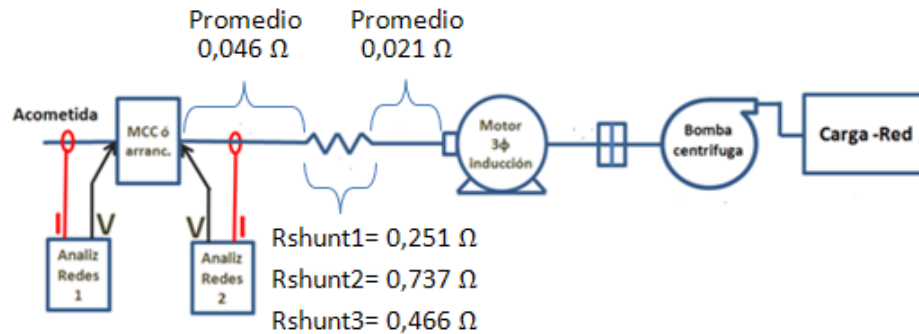
5.6.2.15 Pérdidas en conductores. En el apartado 5.4 y 5.5, figuras 7 y 8 respectivamente, de este informe, se muestra el montaje realizado en el banco de prueba para las pruebas a velocidad constante y a velocidad variable. Se ha mantenido prácticamente la misma instalación de conductores y para efecto de poder tomar con el osciloscopio una muestra de la señal de corriente que sale del variador de velocidad hacia el motor, se instaló una resistencia en cada fase de la alimentación al motor haciendo las veces de resistencia shunt. Se mantienen en las dos pruebas para no variar la topología de la red, aunque para velocidad constante no son necesarias.

Se mide la resistencia de conductores y resistencias shunt, se toma por tabla el valor de resistencia y reactancia de acuerdo al calibre del conductor. En la figura 27 se indica los valores de resistencia para el montaje a velocidad constante

De acuerdo a la norma IEC 60034-2-1 para efecto de cálculos, en sistemas trifásicos se debe trabajar con el valor promedio de las resistencias de fase, esto se puede hacer con los conductores de la instalación, con las resistencias shunt

se trabaja individualmente ya que aunque sus valores son pequeños existen diferencias significativas en sus valores.

Figura 27. Medidas de resistencia de conductores y shunt a velocidad constante



Fuente: El autor

En la herramienta en Excel Anexo F en la zona *determinación pérdidas en conductores eléctricos* se muestra la tabla de Excel para el cálculo de la potencia de pérdidas en los conductores.

Para el cálculo de la potencia de pérdidas en conductores la norma IEC 60034-2-1 define trabajar con el valor de la corriente de línea promedio, que es la misma corriente de fase por estar conectado en Y, para la potencia de pérdidas en la resistencia shunt se hace individualmente. En la herramienta en Excel en las celdas verdes el usuario alimenta la información de valores de longitud de conductores, resistencia por tabla, reactancia y factor de potencia en forma genérica y para el caso particular de estas pruebas se ha asignado una columna para el valor de las pérdidas en las resistencias shunt, que se calculan completamente resistivas, ya que son resistencias de laboratorio.

El Cálculo de pérdidas en conductores es el básico:

Determinar longitud conductor (km)

Hallar en tabla valor de resistencia de acuerdo a calibre (ohm/km)

Hallar en tabla valor de reactancia de acuerdo a calibre (ohm/km). Para instalación de motores con longitudes cortas y menores a 600 voltios, se considera solamente la reactancia inductiva, la reactancia capacitiva se puede despreciar.

Determinar factor de potencia de la instalación

Determinar la corriente de línea promedio

Se halla la impedancia eficaz

$$Z_{ef} = R \cos \alpha + X \sin \alpha \quad (81)$$

Luego se calcula la potencia de pérdidas en conductores

$$P_{cond} = I^2 * Z_{ef} \quad (82)$$

Como ejemplo, para Q de 0.00067 m³/seg. (10.6383 gpm), se tiene:

$$Z_{ef} = (0.0040 * 21.7) * \cos(0.6920) + (0.0040 * 0.2160) * \sin(0.6920) = 0.0674 \Omega \quad (83)$$

$$P_{cond} = 1.9490^2 * 0.0674 = 0.7679 W \quad (84)$$

Las pérdidas en las resistencias shunt de medida se han calculado previamente, para este punto vale 5.5230 W dato que el usuario alimenta. Ahora se calcula la potencia total de pérdidas de conductores y resistencias de medida y se obtiene:

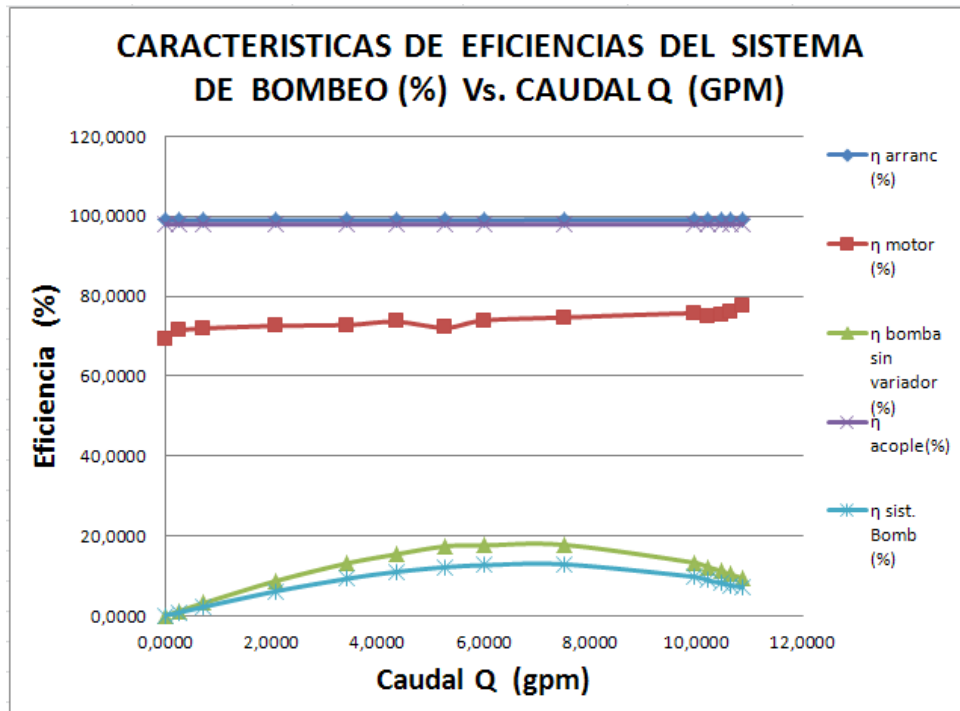
$$P_{Tot cond y res med l} = 0.7679 + 5.5189 = 6,2909 W \quad (85)$$

De la misma manera se completa toda la tabla en Excel.

5.6.2.16 Eficiencia total del sistema de bombeo a velocidad constante. Ya calculadas todas las pérdidas de los componentes del sistema de bombeo y sus eficiencias, se procede a calcular la eficiencia total del sistema de bombeo, para esto, en la herramienta en Excel, anexo F, en la zona *determinación potencias y eficiencias en sistema de bombeo* se muestra la aplicación del modelo en la tabla de Excel. Se calcula de dos formas, en forma directa por la relación de las

potencias de salida y entrada de todo el sistema y mediante el producto de las eficiencias de cada componente.

Figura 28. Características de eficiencia sistema de bombeo a velocidad constante



Fuente: El autor

Como ejemplo, para Q de 0.00067 m³/seg (10.6383 gpm), se tiene

$$\eta_{sist.bombeo} = \frac{P_{tot.util}}{P_{tot.consumida}} * 100 = \frac{33.8697}{434.2786} * 100 = 7,7991\% \quad (86)$$

Mediante el producto de las eficiencias de cada componente se obtiene:

$$\eta_{sist.bom} = \eta_b * \eta_{amb} * \eta_m * \eta_{MCC} = 10,59 * 98 * 76,9261 * 99,1043 = 7,9077\% \quad (87)$$

Se completa toda la tabla. En la figura 28 se muestran las curvas de eficiencia por componente y la total del sistema a velocidad constante Vs. caudal.

Los resultados entre los dos sistemas de determinación de la eficiencia total del sistema muestran una variación de 1.3 %, que se puede deber a los procesos de medición y calculo particulares para cada elemento. Aunque es baja la variación entre los dos métodos, el directo es el más confiable.

Analizando los resultados, en la herramienta en Excel, Anexo F, y como se muestra en la figura 28, la eficiencia total del sistema es bastante baja debido fundamentalmente a la baja eficiencia de la bomba.

5.6.2.17 Costos de energía año a velocidad constante. El fundamento para el cálculo del costo de energía eléctrica y ahorro en un sistema de bombeo se presenta en el marco teórico, anexo A. El resultado práctico del cálculo del costo de energía forma parte del proyecto energético y se presenta en la herramienta en Excel, en el anexo H. Este archivo del anexo H, tiene 3 hojas en la primera hoja con el nombre de *ahorro perfil consumo cualquiera* aparece las tablas que soportan el presente análisis.

Como el proyecto se realiza en un banco de pruebas, para estudiar el costo de energía se toma como referente los caudales manejados en la bomba del banco de prueba, los tiempos por caudal año serán parecidos al estudio de caso mostrado en el marco teórico, anexo A, en el apartado 1.3.4. Aplicando el procedimiento se arma la información que se muestra en la hoja referenciada del anexo H, que se muestra en la tabla 5. Como este análisis es necesario hacerlo también a velocidad variable, se toman los caudales manejados con velocidad constante inicialmente y posteriormente a velocidad variable se trabaja con los más parecidos o se interpolan.

Con base en la tabla 5 a), la potencia consumida por caudal se calcula a partir de las eficiencias de los elementos hasta el motor, cuya salida es la potencia en el eje del motor o BHP o llamada potencia al freno.

Tabla 5. Tabla para hallar el costo de energía a velocidad constante.

a) Potencia consumida por caudal calculada

Caudal (GPM)	Tiempo por caudal año (%)	Potencia al freno por caudal (BHP)	Factor de η componentes hasta BHP (%)	Potencia eléctrica por caudal (HP)	Peso de potencia por caudal anual (HP)
4,3486	5%	0,3598	72,77%	0,4944	0,0247
5,2702	5%	0,3616	71,26%	0,5075	0,0254
6,0193	10%	0,3812	73,05%	0,5219	0,0522
7,5175	10%	0,3958	73,90%	0,5356	0,0536
9,9724	10%	0,4132	74,90%	0,5517	0,0552
10,2064	15%	0,4237	74,16%	0,5714	0,0857
10,4665	20%	0,4284	74,40%	0,5758	0,1152
10,6383	25%	0,4372	75,35%	0,5802	0,1450
Potencia eléctrica promedio (HP)					0,5569
Costo/año = (\$)					
	(Potenc. Prom (HP))	(0,746 KW/HP)	(\$/KWh)	(365 días/año)	(24 hrs/día)
Vel Fija	0,5569	0,746	290,00	365	24
Costo energía a veloc. cte./año (\$)		1.055.442,32			

b) Potencia consumida por caudal medida

Caudal (GPM)	Tiempo por caudal año (%)	Potencia al freno por caudal (BHP)	Factor de η componentes hasta BHP (%)	Potencia eléctrica por caudal (HP)	Peso de potencia por caudal anual (HP)
4,3486	5%	0,3598	72,77%	0,4916	0,0246
5,2702	5%	0,3616	71,26%	0,5047	0,0252
6,0193	10%	0,3812	73,05%	0,5162	0,0516
7,5175	10%	0,3958	73,90%	0,5301	0,0530
9,9724	10%	0,4132	74,90%	0,5462	0,0546
10,2064	15%	0,4237	74,16%	0,5658	0,0849
10,4665	20%	0,4284	74,40%	0,5702	0,1140
10,6383	25%	0,4372	75,35%	0,5747	0,1437
Potencia eléctrica promedio (HP)					0,5517
Costo/año = (\$)					
	(Potenc. Prom (HP))	(0,746 KW/HP)	(\$/KWh)	(365 días/año)	(24 hrs/día)
Vel Fija	0,5517	0,746	290,00	365	24
Costo energía a veloc. cte./año (\$)		1.045.486,56			

Fuente: El autor

En las celdas verdes el usuario suministra la información. Para el caudal de prueba Q de $0.00067 \text{ m}^3/\text{seg}$ (10.6383 gpm) se ha asignado un 25% de utilización de este caudal año. De acuerdo a las mediciones y cálculos, la potencia en el eje o BHP es 0.4372 hp

Para el mismo Q El factor de eficiencias de componentes del sistema de bombeo a nivel eléctrico es el producto de las eficiencias de los componentes hasta la salida del motor en el eje, por lo tanto, se debe tener en cuenta la eficiencia del CCM o arrancador incluyendo las pérdidas en conductores y la eficiencia del motor, por lo cual se tiene:

$$Factor_{\eta \text{ comp.}} = \eta_{arr.} * \eta_{motor.} = 98,9285\% * 76,1636\% = 75.3475\% \quad (88)$$

Ahora teniendo la potencia a la salida del motor o potencia en el eje y el factor de eficiencia, se calcula la potencia eléctrica consumida por caudal:

$$P_{elect.consumida} = \frac{P_{eje}}{Factor_{\eta \text{ comp.}}} = \frac{0,4372 \text{ hp}}{0,7534} = 0,5802 \text{ hp} \quad (89)$$

El peso de potencia por caudal anual es el producto de la potencia eléctrica consumida por el porcentaje de tiempo por caudal año, se tiene:

$$Peso_{pot \text{ } Q\text{-año.}} = P_{elect.consumida} * \%_{tiempo \text{ } Q \text{ año.}} = \\ 0,5802 \text{ hp} * 0,2 = 0.1450 \text{ hp} \quad (90)$$

De la misma forma se completa toda la tabla y se halla el valor de potencia eléctrica promedio como la sumatoria de los pesos de potencia por caudal anual.

El costo de energía a velocidad constante año será igual a:

$$\frac{\$_{ener.vel \text{ cte.}}}{año} = P_{elect.prom}(hp) * 0,746 \left(\frac{KW}{hp} \right) * \frac{\$}{KWH} * \frac{365 \text{ dias}}{año} * \frac{24H}{dia} = \quad (91)$$

$$\frac{\$ener.velcte.}{año} = 0,56(hp) * 0,746 \left(\frac{KW}{hp} \right) * \frac{290 \$}{KWH} * \frac{365 dias}{año} * \frac{24H}{dia} = 1.055.442,32 \quad (92)$$

Como se observa en b) de la tabla 5, la potencia por caudal corresponde a la medición realizada a la entrada del arrancador. La pequeña diferencia entre los resultados de a) y b), se debe precisamente a los cálculos de las potencias.

Se deja este valor en stand by para hacer lo propio con variador de velocidad y la diferencia entre velocidad constante y variable será el ahorro de energía.

Ya se tiene todo el análisis a velocidad constante, ahora se pasa al montaje a velocidad variable adicionando el variador de velocidad AFD al sistema.

5.6.3 Características y análisis de la potencia y eficiencia de cada componente del sistema de bombeo a velocidad variable.

Ahora se sigue el modelo o secuencia definido, pero a velocidad variable con la misma metodología aplicada a velocidad constante, teniendo en cuenta el efecto de la variación de la velocidad a causa de la variación de la frecuencia. La herramienta en Excel para velocidad variable se presenta en el anexo G y se referirá a este anexo para cada uno de los análisis tablas y gráficos que se relacionen.

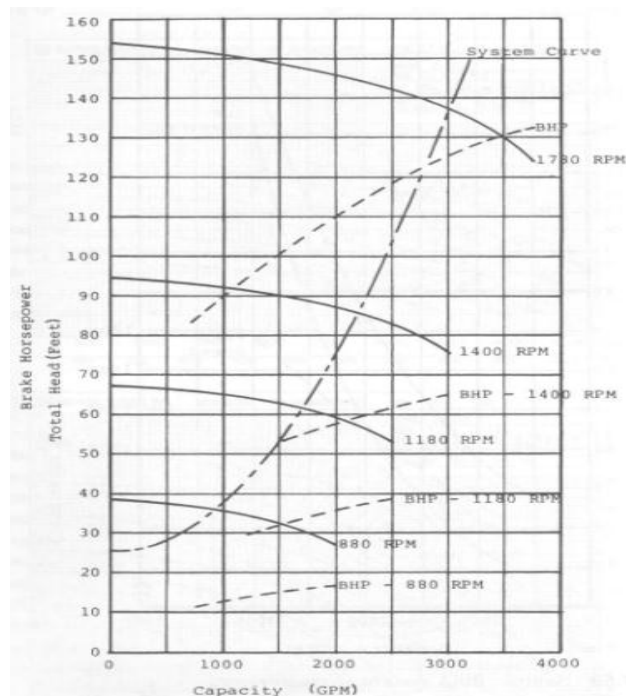
Por efectos de practicidad no se vuelven a realizar las operaciones demostrativas salvo en los casos que lo amerite. Se parte del hecho de considerar las mismas características de la bomba y de la carga del sistema que las consideradas a velocidad constante.

Al variar la velocidad a la bomba, ésta presenta algunas variaciones respecto a las presiones de descarga y succión en baja frecuencia, sin embargo en alta frecuencia a 60 Hz, teniendo todas las válvulas abiertas completamente el sistema

presenta el mismo comportamiento que a velocidad constante, por esta razón se toman las mismas características de carga de la bomba y de carga del sistema que se tomó a velocidad constante, ver figura 14

5.6.3.1 Potencia útil de la bomba a velocidad variable. Al variar la frecuencia del variador de velocidad AFD varía la velocidad del motor que mueve la bomba, con lo cual se logra mover la característica de carga de la bomba con la misma pendiente, manteniendo la misma curva de carga del sistema todo el tiempo, esto implica que se varía el punto de operación del sistema sin tener que provocar pérdidas en el sistema por intervención de válvulas de estrangulamiento, solo se requiere variar la velocidad de la bomba como se observa en la figura 29.

Figura 29. Desplazamiento de la característica de la bomba sobre la curva de carga del sistema al variar la velocidad de la bomba



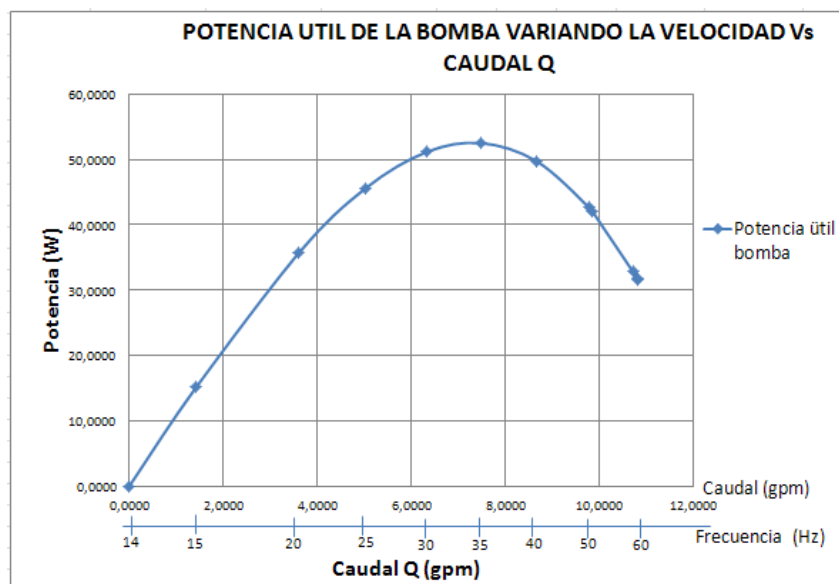
Fuente: [37] Emady, Ali. Energy Efficient Electric Motors. Third Edition revised and expanded. 2005. 406 p. ISBN: 0-8247-5735-1

Siguiendo el modelo aplicado en la herramienta en Excel, y conocida la característica de carga de la bomba, y de la carga del sistema, se procede a calcular la potencia útil de la bomba para cada punto de operación variando la velocidad. En los que se tiene un Q a una cabeza determinada H_b , que multiplicado por el peso específico, del agua, se obtiene la potencia útil:

$$P_{util} = \gamma Q H_b \quad (93)$$

Corresponde a la potencia en cada punto de operación (Qop., Hop.) del intercepto de las características de la bomba, que se va desplazando hacia abajo al disminuir la velocidad. En todo momento la válvula de estrangulamiento esta completamente abierta y el caudal que se obtiene es el máximo para cada velocidad. La potencia útil se expresa en W o en Hp. En el anexo G en la zona *Determinación de las características de Potencia útil, en el eje y eficiencia de la bomba*, se presenta la tabla en la que se calcula la potencia útil expresada en las dos formas y en la figura 30 se muestra la característica a velocidad variable.

Figura 30. Curva de Potencia útil de la bomba Vs Caudal Q/Frecuencia Hz.



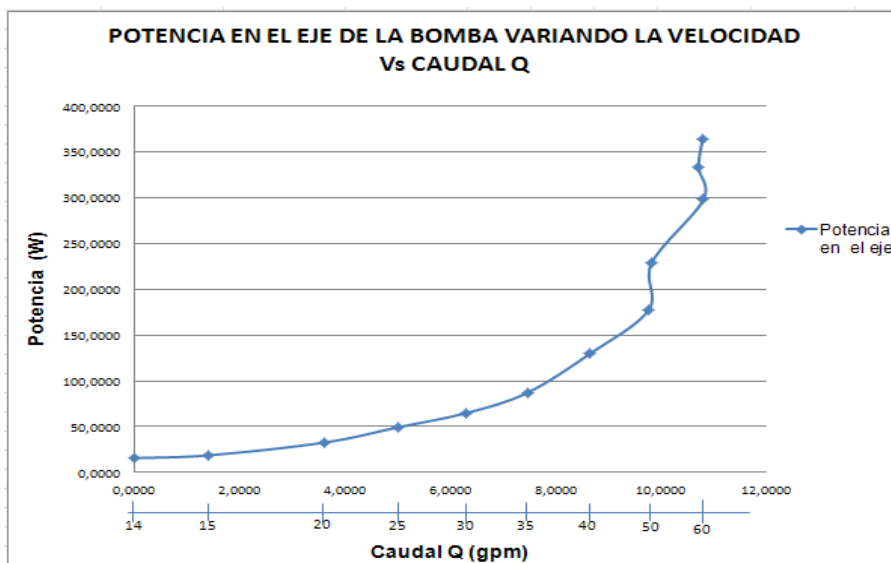
Fuente: El Autor

5.6.3.2 Potencia al freno de la Bomba con velocidad variable. De la misma forma que se calculó la potencia al freno para velocidad constante, se calcula para velocidad variable, se mide en forma directa mediante la balanza y el brazo torsor mostrado en la figura 16. También se corrige las mediciones obtenidas, con el diferencial de la balanza de 2 gramos. En el anexo G en la misma tabla anterior se muestran los cálculos de potencia al freno para cada caudal. A manera de ejemplo para la frecuencia de 57,5 Hz (58) se obtiene:

$$Peje = \frac{T * n * 746}{1000 * 726} = \frac{95.46 \text{ grms} - mts * 3400 \text{ rpm} * 746}{1000 * 726} = 333,5052W \quad (94)$$

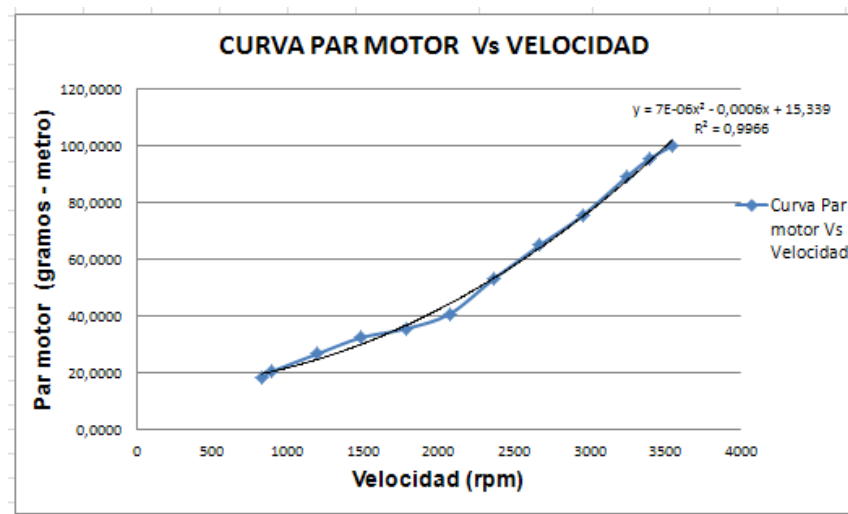
En la figura 31 se muestra la curva resultante de potencia en el eje, al aumentar la velocidad aumenta el par en forma cuadrática, por tanto la potencia es proporcional al cubo de la velocidad, se puede apreciar también en la figura 32. El ahorro de energía en las bombas se fundamenta en este hecho. También contribuye que al aumentar la velocidad de la bomba hay una zona de saturación del caudal, a partir del codo de saturación, las pérdidas son mayores.

Figura 31. Curva de Potencia en el eje Vs. caudal.



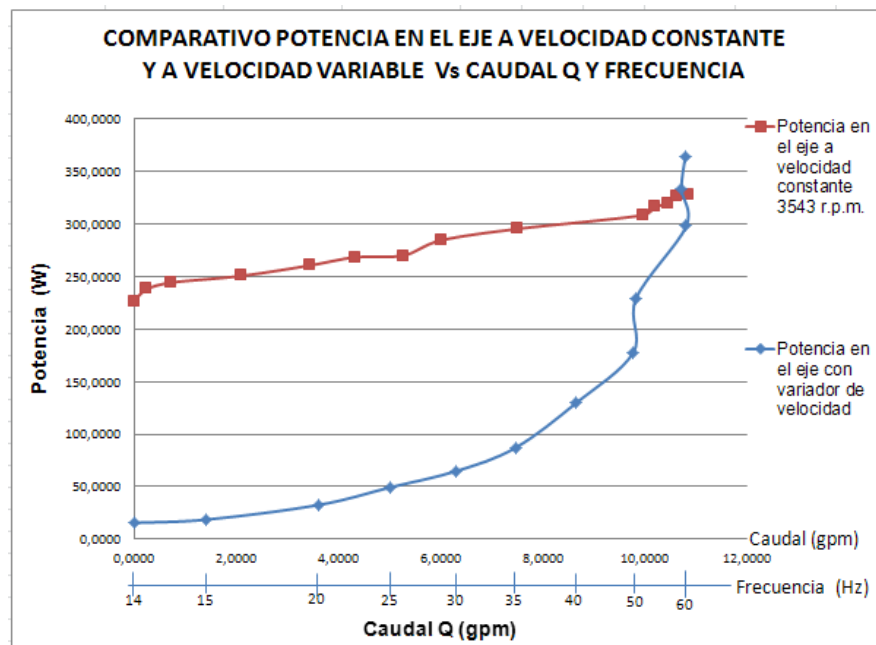
Fuente: El autor

Figura 32. Curva de par motor Vs velocidad.



Fuente: El autor

Figura 33. Comparativo de potencias en el eje a velocidad constante y a velocidad variable versus el caudal y frecuencia.



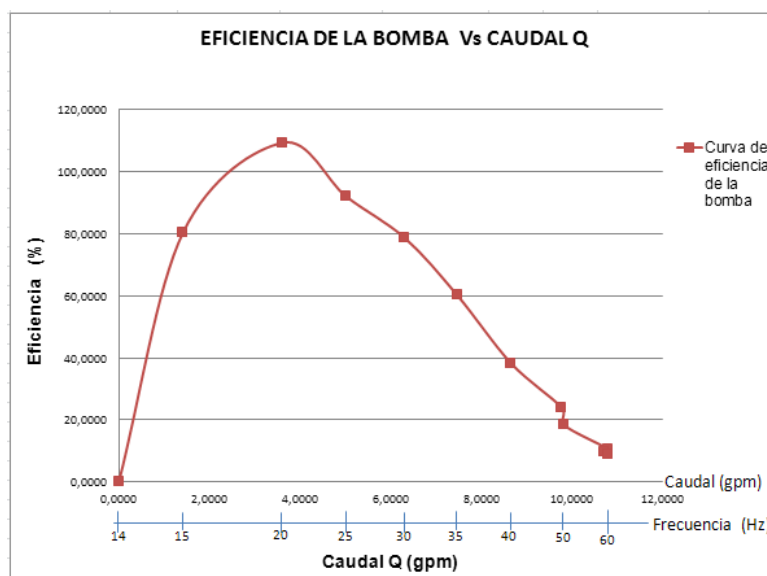
Fuente: El autor

En la figura 33 se muestran comparativamente las características de la potencias en el eje a velocidad constante y con variador para observar las diferencias

Principalmente en los rangos medios y bajos de frecuencia, esto es, por debajo de 50 Hz, es muy significativo la disminución de potencia, principalmente en las frecuencias más bajas. La energía es potencia por tiempo, por lo cual la diferencia de energías consumidas a cada caudal da el ahorro de energía correspondiente. Ahora se continúa aguas arriba hasta tener el sistema completo para ver el ahorro de todo el sistema de bombeo.

5.6.3.3 Eficiencia de la bomba a velocidad variable. Se continúa aplicando el modelo para hallar la eficiencia de la bomba a velocidad variable, similar que a velocidad constante, en el anexo G en la misma tabla de las potencias se muestra la eficiencia resultante y se construye la gráfica, que se muestra en la figura 34.

Figura 34. Curva de eficiencia de la bomba a velocidad variable en función del caudal Q y de la Frecuencia.



Fuente: El autor

5.6.3.4 Rango y punto de mayor eficiencia de la bomba. En la gráfica 34 se observa que a bajos caudales y bajas frecuencias se obtiene el sector o rango de mayor eficiencia de la bomba. Para la frecuencia de 20 Hz y el caudal de 3,61 gpm se obtiene una eficiencia mayor que el 100%, valor que en la práctica no es posible que se dé, sin embargo en las pruebas realizadas y siguiendo el modelo y la rigurosidad de las tomas de datos, el cálculo con base en la información obtenida dio este valor.

Pueden existir varias causas, una es error en las mediciones, aunque las pruebas se hicieron con el rigor y procedimiento correspondiente. Otras causas pueden ser atribuidas a la presencia del variador de velocidad en el circuito.

Es conocido que por el proceso de modulación de la frecuencia en el variador, se producen varios efectos que afectan el conjunto variador – motor, entre estos está que para ciertas frecuencias, éste se comporta como carga capacitiva. Debido al disparo de todos los semiconductores del variador, pueden existir efectos hacia la fuente no identificados aún.

Otro punto importante es que no es posible hacer una medición efectiva a la salida del variador por el gran contenido armónico de la salida, por lo cual es necesario tomar el conjunto variador motor como un todo, como una caja negra, que a la salida entrega una potencia mecánica en el eje que es la potencia medida en forma directa con el brazo torsor y la balanza y que sirve de entrada a la bomba, habiendo tenido en cuenta la eficiencia del acople motor bomba.

Estos efectos se pudieron observar en las pruebas realizadas y los datos están registrados en la información extraída a los analizadores de red los cuales se presentan en el Anexo E correspondientes a las lecturas de las pruebas a velocidad variable.

Por lo anterior, para efectos de esta investigación, estas son las principales causas que pudieron incidir en la eficiencia mayor al 100% calculada. Para efectos de profundización de estos efectos y fenómenos será motivo de otro proyecto de investigación que se escapa del alcance del actual.

5.6.3.5 Diagnóstico de requerimiento de potencia del motor en función del caudal de la bomba y de la velocidad. Con base en los resultados de eficiencia de la bomba en función del caudal y a velocidad variable, se puede determinar que potencia de motor se requiere para mover la bomba, dependiendo del punto de operación o de los puntos si es el caso, que como se dijo en apartados anteriores, el proceso es la carga y esta define los requerimientos de caudal.

De acuerdo a los resultados, para la máxima eficiencia a 3,61 gpm o 20 Hz el motor entrega una potencia de 32,6844 w o 0,0438 hp y al más alto caudal que es 10,80 gpm a 60Hz la potencia entregada en el eje es 364,0042 W o 0,4879 hp. Tomando un factor de servicio igual al tomado a velocidad constante que es del 10% y asumiendo que el motor no solo trabajará a su máxima eficiencia que sería lo esperado o por lo menos alrededor de ésta, y tomando el punto de menor eficiencia que es el de mayor caudal, el motor debería ser de 0,53669 hp, sabiendo que en el sector de medianas y más altas frecuencias, tomando como máximo 60 Hz, el motor es muy ineficiente.

El objetivo con este análisis es poder determinar el punto o rango de mayor eficiencia de la bomba para seleccionar el motor adecuado para minimizar los costos de energía cumpliendo con los requerimientos de la carga. Con base en lo anterior se presenta un compromiso técnico económico que dependiendo de lo disponible en el mercado debe usarse la mejor opción con base en este análisis.

De lo anterior y teniendo en cuenta que el motor utilizado en el banco de prueba fue de acuerdo a la potencia que tenía originalmente el banco, un motor DC de

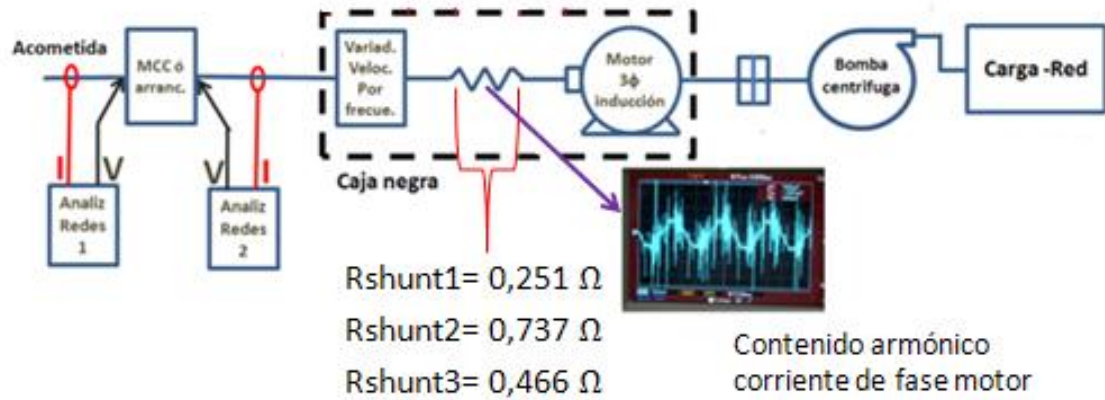
1000W y lo disponible que se encontró fue 1,2 hp, este motor este sobredimensionado y tan solo se está utilizando un 44,72 % teniendo en cuenta el factor de servicio, con lo cual también se cubren las pérdidas que presenta el acople motor que se tomó con una eficiencia del 98%.

5.6.3.6 Eficiencia del acople motor bomba. Se toma el mismo cálculo, tanto para velocidad constante como para velocidad variable, sin embargo es claro, como se argumentó en el marco teórico, anexo A, que el acople es proporcional al momento y este es proporcional a la velocidad angular, por lo tanto lo esperado es que para bajos caudales, los cuales se dan a bajas frecuencias, por lo tanto las velocidades son bajas y las perdidas en el acople serán menores, sin embargo se toma la misma eficiencia del 98 %, teniendo en cuenta que requieran el máximo caudal

5.6.3.7 Eficiencia del grupo Variador – Motor. En el marco teórico, anexo A, se estudió la incidencia del variador de velocidad en el sistema de bombeo, por lo cual se debe tomar el conjunto variador motor como una caja negra, para analizar su eficiencia como conjunto ya que no es posible determinar la eficiencia de cada uno de los componentes por separado , debido a la gran distorsión de las tensiones y corrientes a la salida del variador, las cuales tienen un importante contenido armónico. En la figura 35 se muestra una imagen de la señal de tensión a la salida del variador donde se aprecia la distorsión referenciada.

Como se observa en la figura 35, la señal registrada es tomada con un osciloscopio a través de una resistencia shunt. La señal es de tensión, que es lo que mide un osciloscopio, pero como lo está haciendo a través de una resistencia, la corriente está en fase con la tensión, por lo cual se entiende que la señal medida representa la forma de onda de la corriente de fase entregada por el variador al motor que es proporcional al voltaje.

Figura 35. Señal de tensión a la salida del variador de velocidad.



Fuente: El autor

En el anexo E se tienen los registros de las mediciones obtenidas a velocidad variable por el analizador de redes a la salida del arrancador. De igual manera en el anexo D se tiene el mismo registro pero sin variador, a velocidad constante, por lo cual se pueden hacer las comparaciones correspondientes.

En la herramienta en Excel, anexo G, en la zona *determinación eficiencia del grupo variador velocidad AFD – motor*, se muestra la tabla construida para determinar la eficiencia del conjunto variador de velocidad – motor.

La eficiencia del conjunto variador bomba se determina como:

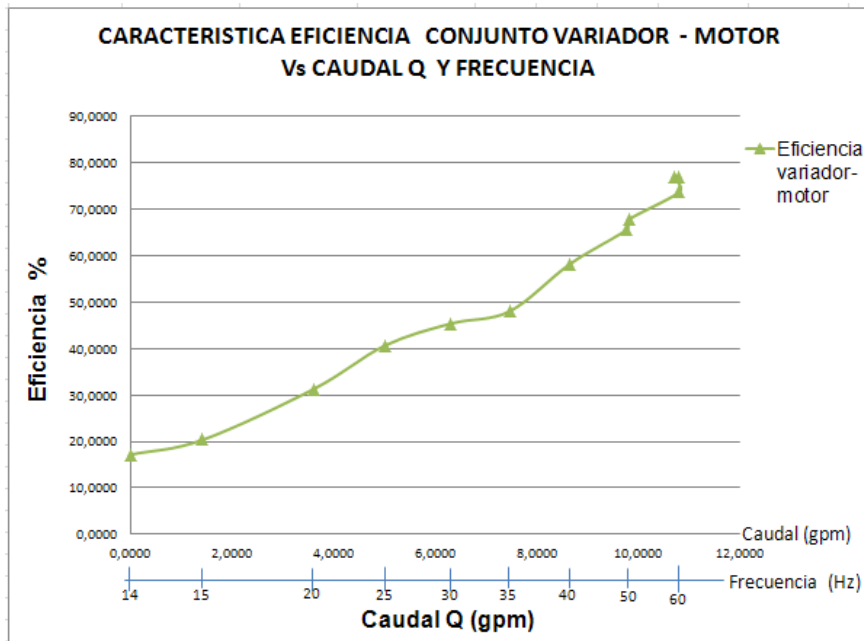
$$Efic. AFD - motor = \frac{\text{Potencia en el eje}}{\text{Total de potencia eléctrica consumida por el AFD}} = [\%] \quad (95)$$

Como ejemplo, aplicando para 60 Hz se obtiene

$$Efic. AFD - motor = \frac{364,0042}{472,2832} * 100 = 77,0733\% \quad (96)$$

En la figura 36 se muestra la curva de eficiencia del conjunto variador - motor

Figura 36. Característica de Eficiencia conjunto Variador de velocidad - motor en función del caudal Q y de la frecuencia.



Fuente El autor

5.6.3.8 Rango y punto de mayor eficiencia del conjunto variador- motor. De la figura 36 se observa que a medida que aumenta la frecuencia y por tanto el caudal, la eficiencia también aumenta, a diferencia de la eficiencia del motor a velocidad constante, donde la variación con el caudal es mínima, es prácticamente constante.

Se debe tener en cuenta que el motor está subcargado, por tanto está trabajando en la zona lineal de la característica Par Vs. Velocidad, por lo cual no afecta el comportamiento de la eficiencia.

De acuerdo al comportamiento de la gráfica, como va aumentando la eficiencia con la frecuencia y por tanto con el caudal, se puede prever que la mayor eficiencia, dentro del rango de la frecuencia industrial, se logra a la máxima frecuencia de operación normal, esto es a 60 Hz y por tanto, el caudal correspondiente a esta frecuencia y el sector de máxima eficiencia estará alrededor de este punto, pero no tiene marcadamente un punto de máxima eficiencia como si se presenta en la eficiencia de la bomba centrífuga, comportamiento que no afecta ni se parece al comportamiento del conjunto variador de velocidad – motor.

5.6.3.9 Pérdidas y eficiencia del Centro de Control de Motores MCC o arrancador a velocidad variable.

En la herramienta en Excel, anexo G, en la zona *determinación eficiencia CCM o arrancador*, se muestra la tabla para determinar las pérdidas y la eficiencia del arrancador utilizado en la prueba.

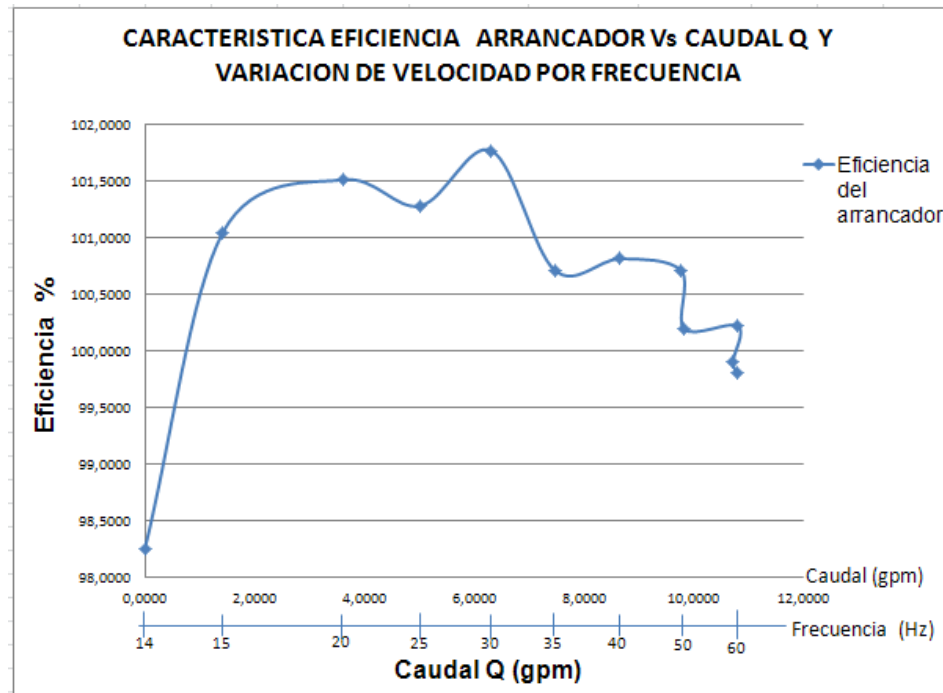
Se han utilizado dos analizadores de red, uno a la entrada y otro a la salida del arrancador, así se puede encontrar la potencia de pérdidas, como la diferencia entre la potencia a la entrada y a la salida del arrancador.

Se observa que en la mayoría de puntos, la potencia de salida es mayor que la potencia de entrada, por lo cual las pérdidas de potencia en el arrancador resultan negativas, caso que no es normal, pero teniendo en cuenta el comportamiento del variador de velocidad, que es la carga para el arrancador, este efecto capacitivo es debido al procesos de modulación propio del variador.

También incide el hecho de tener un motor de muy baja potencia, el cual es controlado con un variador de velocidad que está en capacidad de manejar una carga mayor, lo cual causa un mayor efecto capacitivo.

En la figura 37 se presenta la curva de eficiencia del arrancador versus el caudal y frecuencia, construida con base en la tabla de la herramienta en el anexo G

Figura 37. Característica de eficiencia del arrancador en función del caudal con variación de velocidad por frecuencia



Fuente: El autor

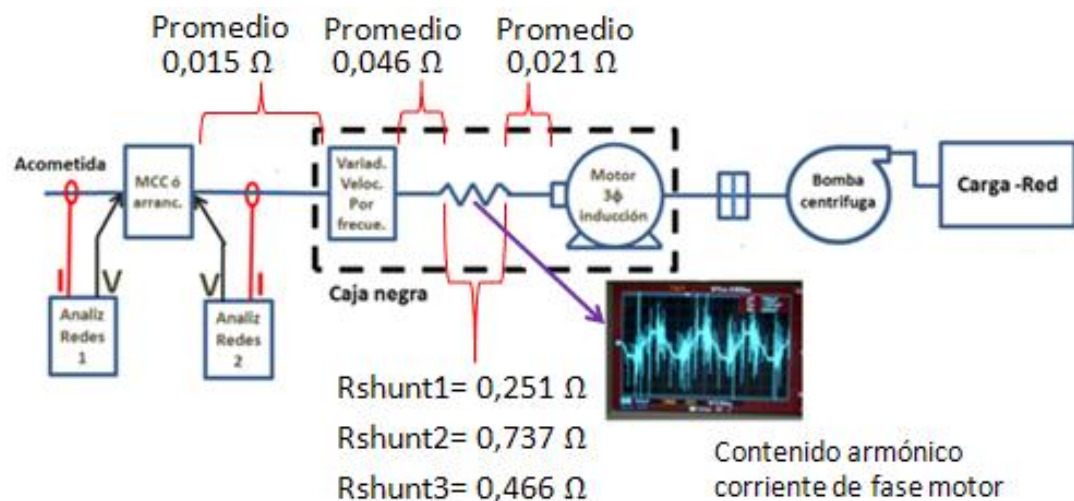
De la figura se observa eficiencias por encima del 100%, caso que no es posible, pero este hecho se debe al efecto capacitivo del conjunto variador – motor como se explicó en el párrafo anterior.

5.6.3.10 Pérdidas en conductores. En el apartado de Montaje y mediciones a velocidad variable del Anexo A se estudió y mostró las conexiones correspondientes para el banco de prueba respectivo y su instalación de conductores para conectar los diferentes instrumentos de medición utilizados,

entre estos las resistencias shunt utilizadas para intentar medir la forma de onda de la tensión y corriente de salida del variador hacia el motor. En la figura 38 se muestra esta instalación, es la misma que la utilizada a velocidad constante, pero adicionando el variador de velocidad.

El método de cálculo de pérdidas en conductores es el mismo que a velocidad constante, se debe tener en cuenta ajustar las longitudes de los conductores e incluir la potencia de pérdidas en las resistencias shunt de medida.

Figura 38. Valores de resistencias medidas de los conductores utilizados en las conexiones para las pruebas a velocidad variable



Fuente: El autor

En la herramienta en Excel, anexo G se presenta la tabla construida para el cálculo de las pérdidas en los conductores y las pérdidas en las resistencias shunt. Al valor de potencia consumida total a la entrada del arrancador se le resta la potencia de pérdidas en las resistencias shunt de medida de la tensión y corriente de salida del variador hacia el motor, para que la potencia de estas resistencias, externas, no afecten la potencia total consumida por el sistema.

5.6.3.11 Eficiencia total del sistema de bombeo a velocidad variable. Ya calculadas todas las perdidas de los componentes del sistema de bombeo y sus eficiencias, se calcula la eficiencia total del sistema de bombeo, siguiendo el modelo como se hizo para velocidad constante pero ahora teniendo en cuenta todos los resultados a velocidad variable.

En la herramienta en Excel para velocidad variable, Anexo G, se muestran las dos formas de calcular esta eficiencia, la indirecta por el producto de las eficiencias de cada componente, esto es el producto de las eficiencias de la bomba, acople motor-bomba, conjunto variador – motor y CCM o arrancador y en forma directa, por la relación entre las potencias de salida y entrada de todo el sistema.

Como se observa, existe una pequeña diferencia entre los dos métodos, debida principalmente en el método indirecto al producto de las eficiencias y al cálculo de cada una de éstas.

Tomando como ejemplo la frecuencia de 30 Hz se tiene para las dos formas:

En forma indirecta, por el producto de las eficiencias de los componentes del sistema:

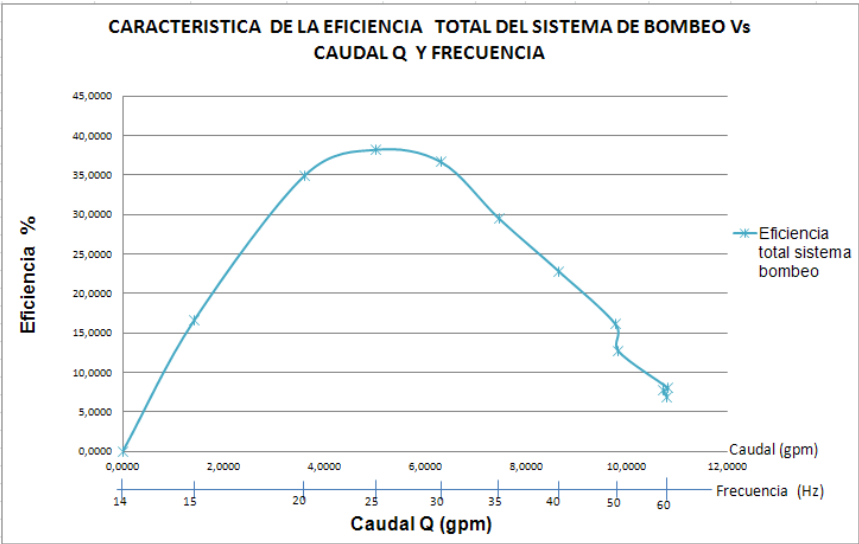
$$\eta_{s.bom} = \eta_b * \eta_{am-b} * \eta_{m-v} * \eta_{MCC} = 80,2433 * 98 * 45,4157 * 101,7452 = 36,3377\% \quad (97)$$

Por la forma directa mediante la relación entre la potencia útil leída y la potencia total consumida leída:

$$\eta_{sist.bombeo} = \frac{P_{tot.util}}{P_{tot.consumida}} * 100 = \frac{51,1183}{140,7808} * 100 = 36,3106 \quad (98)$$

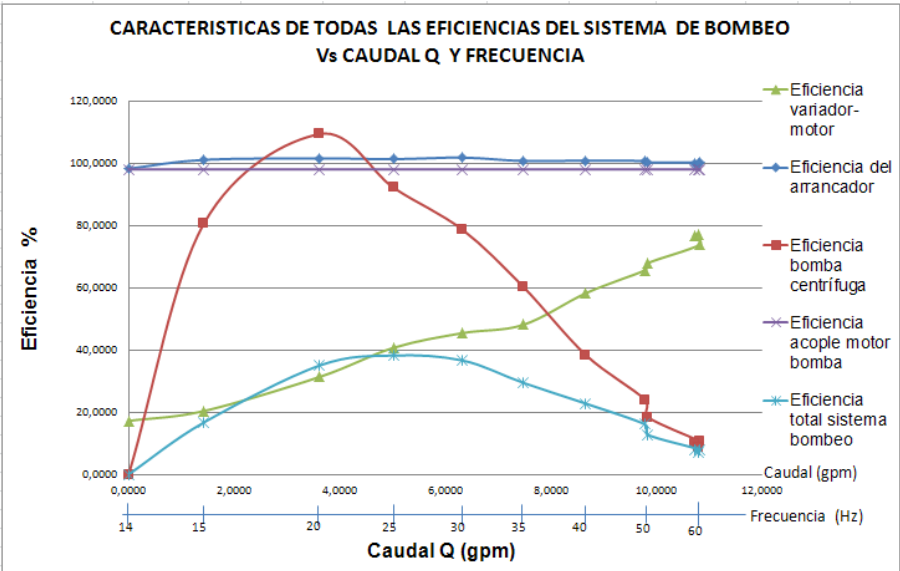
Se completa la tabla en Excel y se construyen las figuras correspondientes. En las figuras 39 y 40 se muestran la eficiencia de todo el sistema y las eficiencias de los componentes del sistema respectivamente.

Figura 39. Característica de Eficiencia de todo el sistema de bombeo



Fuente: El autor

Figura 40. Características de las eficiencias del sistema de bobeo, de todos los componentes y la total

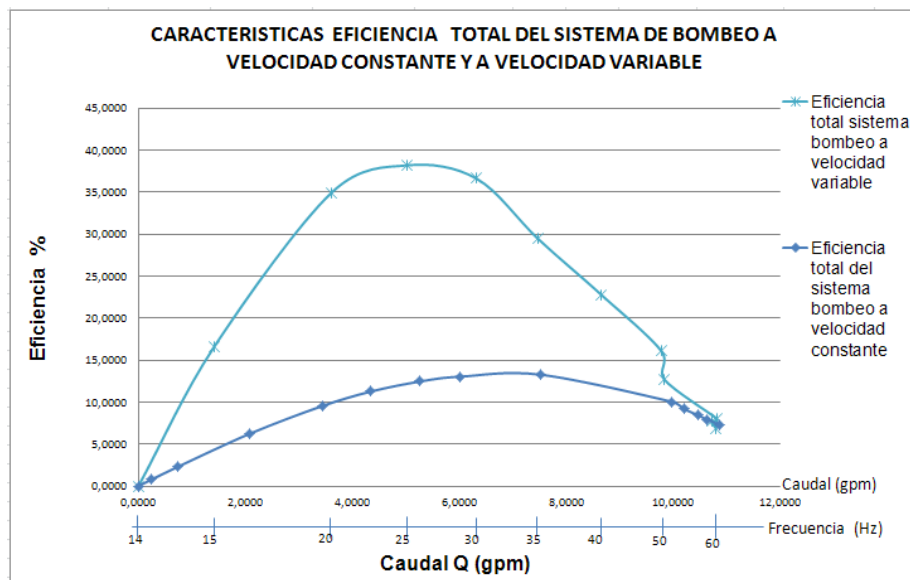


Fuente: El autor

De las figuras 28, 39 y 40, se puede inferir que el sistema de bombeo a velocidad variable es más eficiente que a velocidad constante. La máxima eficiencia del sistema a velocidad variable es un poco más del doble que la máxima eficiencia del sistema a velocidad constante. La primera se logra a un caudal de 5,0204 gpm. a una velocidad de 1486 rpm, cuya frecuencia es 25 Hz. También se observa que el rango de mayor eficiencia está en el rango aproximado de velocidad de 1186 rpm a 2075 rpm. Correspondiente a 20Hz a 35 Hz

Continuando la comparación se encuentra que a velocidad constante el sistema presenta su máxima eficiencia a un caudal aproximado de 7, 5 gpm, esto es aproximadamente un 50% mayor que a velocidad variable. En la Figura 41 se muestran las eficiencias totales de los dos sistemas a velocidad constante y a velocidad variable para apreciar sus diferencias. El motor está subcargado, puede variar algo al cargarlo completamente.

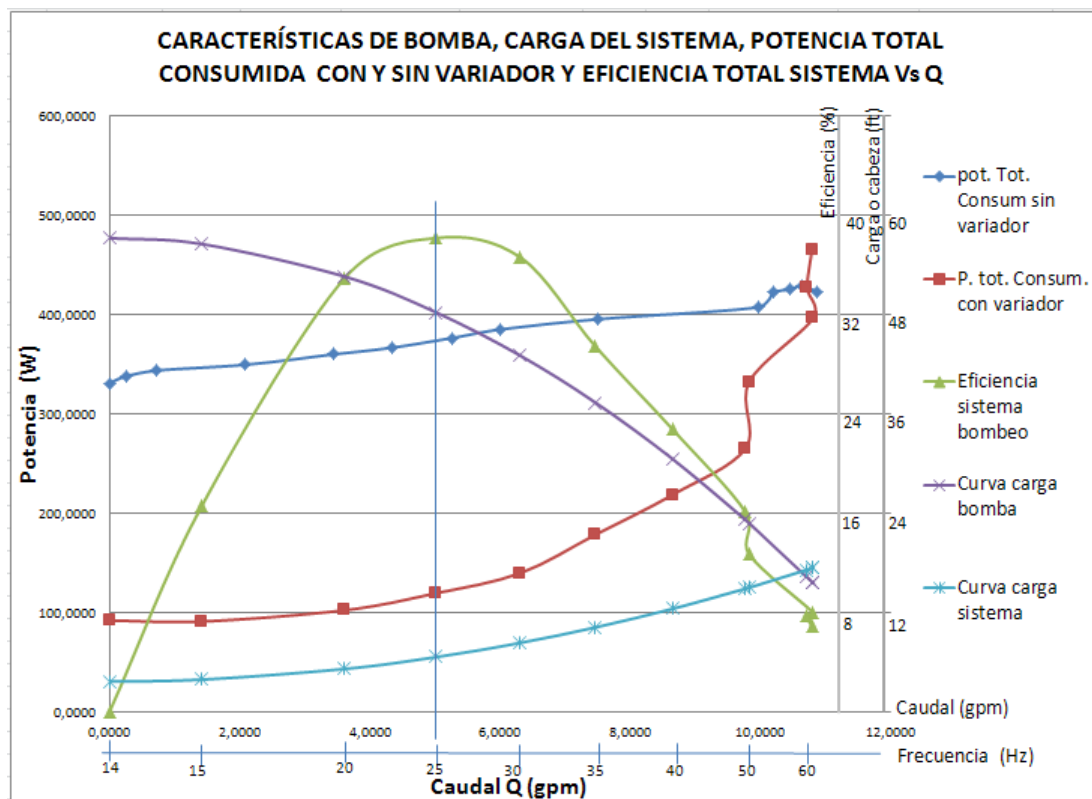
Figura 41. Eficiencias totales del sistema de bombeo a velocidad constante y a velocidad variable.



Fuente: El autor

De la herramienta en Excel a velocidad variable, anexo G, se muestra la figura 42 con las gráficas de potencias totales de los sistemas a velocidad constante y velocidad variable, curvas de carga de la bomba y carga del sistema, potencias en el eje para ambos sistemas y la eficiencia total del sistema con velocidad variable, la cual sirve de comparativo para obtener importantes conclusiones sobre el comportamiento del sistema de bombeo.

Figura 42. Características de bomba, carga del sistema, potencia total consumida con y sin variador y eficiencia total sistema



Fuente: El autor

5.6.4 Balance de potencia de los sistemas de bombeo a máxima eficiencia

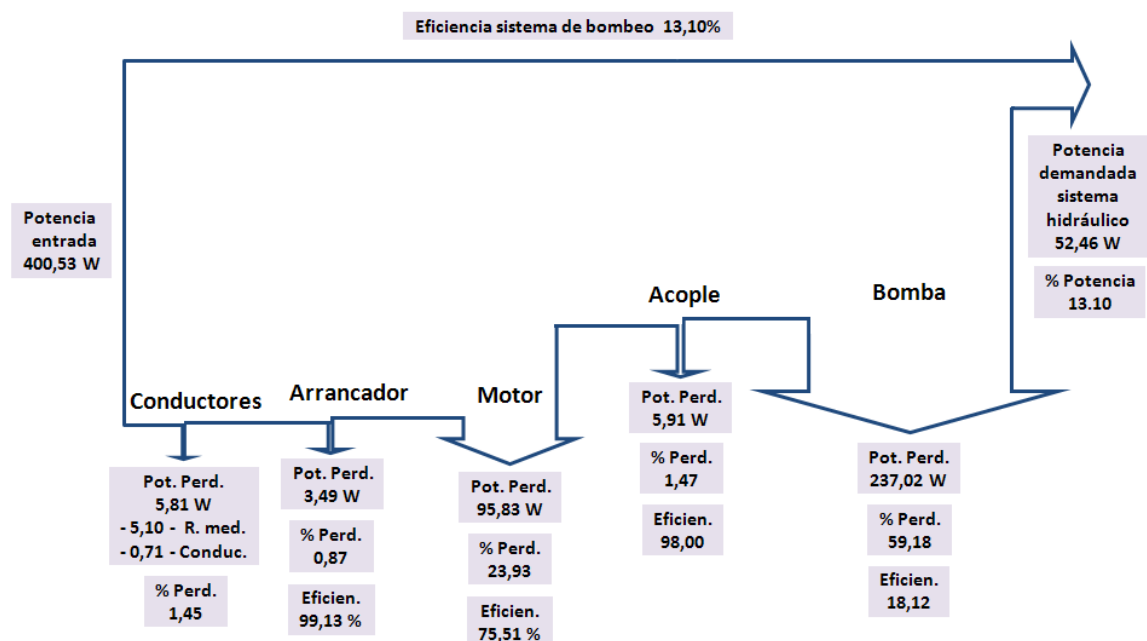
Con base en los resultados, como resumen, se muestra el balance de potencia a máxima eficiencia de los sistemas de bombeo a velocidad constante y velocidad variable en las tablas 6, 7 y figuras 43 y 44 respectivamente

Tabla 6. Balance de potencia del sistema de bombeo en punto de máxima eficiencia a velocidad constante

Balance de potencia a velocidad constante en punto de mayor eficiencia sistema bombeo (7,52 gpm), 3538 rpm, 60Hz							
Variables	Sistema de bombeo	Conductores	MCC o Arrancador	Motor	Acople	Bomba	Sistema hidráulico
Potencia Entrada (W)	400,53		400,53	391,22	295,39	289,48	52,46
P salida (W)	52,46		397,03	295,39	289,48	52,46	
P perdidas (W)	348,06	5,82	3,49	95,83	5,91	237,02	52,46
Porcentaje de pérdidas (%)	86,90	1,45	0,87	23,93	1,47	59,18	13,10
Eficiencia (%)	13,10		99,13	75,51	98,00	18,12	

Fuente: El autor

Figura 43. Diagrama de Sankey del sistema de bombeo en el punto de máxima eficiencia a velocidad constante



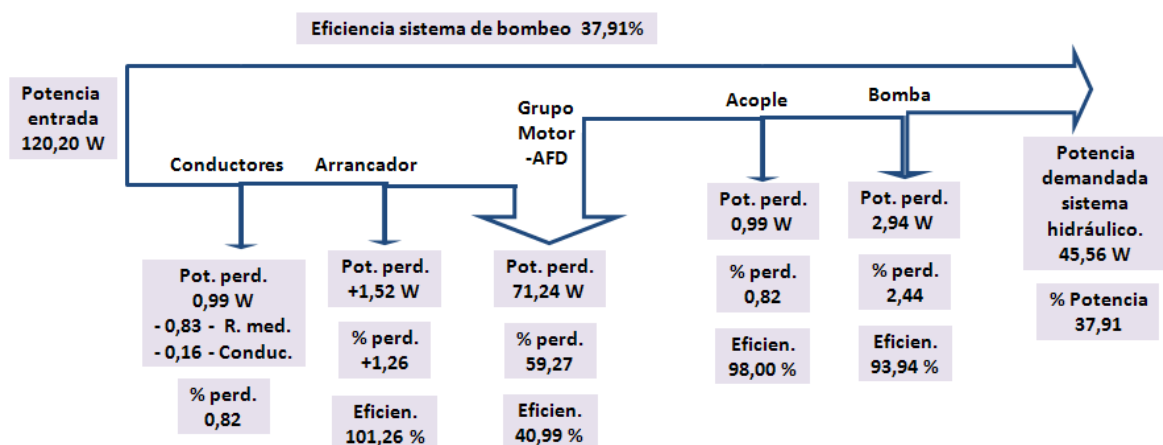
Fuente: El autor

Tabla 7. Balance de potencia del sistema de bombeo en punto de máxima eficiencia a velocidad constante

Balance de potencia a velocidad variable en punto de mayor eficiencia sistema bombeo (5,02 gpm), 1486 rpm, 25 Hz							
Variables	Sistema de bombeo	Conductores	MCC o Arrancador	Grupo Motor-AFD	Acople	Bomba	Sistema hidráulico
Potencia Entrada (W)	120,20		120,20	120,73	49,49	48,50	45,56
P salida (W)	45,56		121,71	49,49	48,50	45,56	
P perdidas (W)	74,63	0,99	-1,52	71,24	0,99	2,94	45,56
Porcentaje de pérdidas (%)	62,09	0,82	-1,26	59,27	0,82	2,44	37,91
Eficiencia (%)	37,91		101,26	40,99	98,00	93,94	

Fuente: El autor

Figura 44. Diagrama de Sankey del sistema de bombeo en el punto de máxima eficiencia a velocidad constante



Fuente: El autor

Los diagramas de Sankey facilitan apreciar el beneficio de utilizar variadores de velocidad en los sistemas de bombeo. Al disminuir la velocidad de la bomba, ésta disminuye al cubo la potencia consumida y se incrementa la eficiencia del sistema. Del análisis de los resultados se ha hecho el diagnóstico. En Excel en el anexo I, se presentan las relaciones entre los elementos para cada sistema

5.6.5 Costos de energía año a velocidad variable.

Como se calculó el costo de energía a velocidad constante, se calcula a velocidad variable, teniendo en cuenta que el presente proyecto se ha realizado en un banco de prueba. Se trabaja con los caudales obtenidos al variar la velocidad mediante el variación de frecuencia en cada punto de operación. Como lo esperado es encontrar el ahorro de energía, como resultado de la diferencia entre el consumo de energía a velocidad variable y a velocidad constante, como ejemplo para el análisis, se toman los mismos tiempos de caudal por año.

En la herramienta en Excel, anexo H, en las dos primeras hojas se muestra la información correspondiente para hallar el costo de energía a velocidad variable, con base en las mediciones de potencia por caudal registradas desde la entrada,

Tabla 8. Tabla para hallar el costo y ahorro de energía a velocidad variable

Frecuencia Hz	Velocidad rpm	Caudal (GPM)	Tiempo por caudal año (%)	Potencia al freno por caudal (BHP)	Factor de η componentes hasta BHP (%)	Potencia eléctrica por caudal (HP)	Peso de potencia por caudal anual (HP)
20	3,6132	3,6132	5%	0,0438	31,75	0,1600	0,0080
25	5,0204	5,0204	5%	0,0663	41,18	0,1872	0,0094
30	6,3193	6,3193	10%	0,0871	46,17	0,2392	0,0239
35	7,4738	7,4738	10%	0,1167	48,35	0,2931	0,0293
50	9,8350	9,8350	10%	0,3072	67,96	0,3558	0,0356
55	10,8173	10,8173	15%	0,3995	73,87	0,4454	0,0668
57,5	10,7258	10,7258	20%	0,4471	76,65	0,5316	0,1063
60	10,8004	10,8004	25%	0,4879	76,74	0,5722	0,1430
Potencia eléctrica promedio (HP)							0,4223
Costo/año = (Potenc. Prom (\$))		(0,746 KW/HP)		(\$/KWh)		(365 días/año)	
Vel fija	0,5517	0,746		290,00	365	24	
Vel. Variabl.	0,4223						
Costo energía a veloc. cte./año (\$)				1.045.486,56			
Costo energía a veloc. variable./año (\$)				800.367,03			
\$ AHORRO	245.119,54	23,4455%					

Fuente: El autor

En la parte inferior de la tabla 8 se muestran los resultados del costo de energía tanto a velocidad constante calculado en su momento, como a velocidad variable, calculado de la misma forma a valores de caudal muy similares a los de velocidad constante, pero indicando para cada uno su velocidad y frecuencia

Se muestra el ahorro como la diferencia entre el costo de energía a velocidad constante y a velocidad variable y se indica el porcentaje ahorrado al utilizar variador de velocidad, que es de 23,4455%, para los caudales utilizados con unos tiempos al azar.

5.6.6 Ahorro de energía.

En la tabla 9 se muestra el cuadro con el resumen del promedio de ahorro por año visto a 10 años, es un cuadro resumen, sin embargo, mas adelante se presenta el análisis del proyecto energético completo, teniendo en cuenta todas las variables del proyecto y se hace el estudio de viabilidad financiero respectivo.

Tabla 9. Cuadro con el promedio de ahorro año visto a 10 años

Promedio /ahorro/Año			
Año	Tasa de oportunidad %	Valor presente de ahorro	Valor futuro de ahorro
1	5	245.119,54	257.375,51
2	5	245.119,54	270.244,29
3	5	245.119,54	283.756,51
4	5	245.119,54	297.944,33
5	5	245.119,54	312.841,55
6	5	245.119,54	328.483,62
7	5	245.119,54	344.907,81
8	5	245.119,54	362.153,20
9	5	245.119,54	380.260,86
10	5	245.119,54	399.273,90
Promedio de ahorro/año (valor futuro)			323.724,16
Total de ahorro - 10 años (valor presente)			2.451.195,38
Total de ahorro - 10 años (valor futuro)			3.237.241,57

Fuente: El Autor

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, como los tiempos por caudal mostrados en la tabla 10, no están en la región de mayor eficiencia, ver figura 42, se varía los tiempos por caudal para la zona de mayor eficiencia, que es lo sugerido en condiciones de operación normal, para que el sistema opere a la mayor eficiencia y así lograr un mayor ahorro de energía.

Tabla 10. Tabla en Excel para calcular el costo y ahorro de energía entre velocidad variable y constante

Caudal (GPM)	Tiempo por caudal año (%)	Potencia al freno por caudal (BHP)	Factor de η componentes hasta BHP (%)	Potencia eléctrica por caudal (HP)	Peso de potencia por caudal anual (HP)
4,3486	20%	0,3598	72,77%	0,4916	0,0983
5,2702	25%	0,3616	71,26%	0,5047	0,1262
6,0193	20%	0,3812	73,05%	0,5162	0,1032
7,5175	10%	0,3958	73,90%	0,5301	0,0530
9,9724	10%	0,4132	74,90%	0,5462	0,0546
10,2064	5%	0,4237	74,16%	0,5658	0,0283
10,4665	5%	0,4284	74,40%	0,5702	0,0285
10,6383	5%	0,4372	75,35%	0,5747	0,0287
	100%				
Potencia eléctrica promedio a velocidad constante(HP)					0,5209

Frecuencia Hz	Velocidad rpm	Caudal (GPM)	Tiempo por caudal año (%)	Potencia al freno por caudal (BHP)	Factor de Eficiencia por componentes (%)	Potencia eléctrica por caudal (HP)	Peso de potencia por caudal anual (HP)
20	3,6132	3,6132	20%	0,0438	31,75	0,1600	0,0320
25	5,0204	5,0204	25%	0,0663	41,18	0,1872	0,0468
30	6,3193	6,3193	20%	0,0871	46,17	0,2392	0,0478
35	7,4738	7,4738	10%	0,1167	48,35	0,2931	0,0293
50	9,8350	9,8350	10%	0,3072	67,96	0,3558	0,0356
55	10,8173	10,8173	5%	0,3995	73,87	0,4454	0,0223
57,5	10,7258	10,7258	5%	0,4471	76,65	0,5316	0,0266
60	10,8004	10,8004	5%	0,4879	76,74	0,5722	0,0286
Potencia eléctrica promedio a velocidad variable (HP)							0,2690

Costo/año = (\$)	(Potenc. Prom (HP))	(0,746 KW/HP)	(\$/KWH)	(365 días/ año)	(24 hrs/día)
Vel Fija	0,5209	0,746	290,00	365	24
Vel. Variabl.	0,2690				
Costo energía a veloc. cte./año (\$)	987.196,54			Cantidad KWH	3.404,13
Costo energía a veloc. cte./año (\$)	509.751,91			Cantidad KWH	1.757,77
\$ AHORRO/AÑO	477.444,63	48,36%		AHORRO KWH/AÑO	1.646,36

Fuente: El autor

En la tabla 10 se muestra la información para hallar los costos de energía tanto a velocidad constante como variable, teniendo en cuenta los mayores tiempos por caudal para la zona de mayor eficiencia y los resultados correspondientes junto con el respectivo ahorro de energía, lo cual también forma parte de la herramienta en Excel.

Comparativamente los anteriores resultados duplican el ahorro respecto al sistema en el cual los tiempos por caudal no estaban focalizados sobre la zona de mayor eficiencia. Lo anterior confirma la importancia de tratar de operar en la zona de mayor eficiencia del sistema para lograr el mayor ahorro.

En la tabla 11 se muestra el cuadro con el resumen del promedio de ahorro por año en el caso anterior, visto a 10 años.

Tabla 11. Cuadro con el promedio de ahorro año visto a 10 años con tiempos de caudal de mayor eficiencia

Promedio /ahorro/Año			
Año	Tasa de oportunidad %	Valor presente de ahorro	Valor futuro de ahorro
1	5	477.444,63	501.316,87
2	5	477.444,63	526.382,71
3	5	477.444,63	552.701,84
4	5	477.444,63	580.336,94
5	5	477.444,63	609.353,78
6	5	477.444,63	639.821,47
7	5	477.444,63	671.812,55
8	5	477.444,63	705.403,17
9	5	477.444,63	740.673,33
10	5	477.444,63	777.707,00
Promedio de ahorro/año (valor futuro)			630.550,97
Total de ahorro - 10 años (valor presente)			4.774.446,34
Total de ahorro - 10 años (valor futuro)			6.305.509,66

Fuente: El autor.

5.6.7 Proyecto de eficiencia energética.

Con base en las tablas y en los cuadros de la herramienta en Excel, anexo H, se aprecia el ahorro de energía obtenido tanto por año, como a 10 años y se puede deducir que el hecho de la implementación del variador de velocidad al motor de una bomba es una buena alternativa para este fin, sin embargo en los resultados obtenidos solo se muestra el ahorro logrado, falta verlo como proyecto, se debe tener en cuenta el costo de los estudios requeridos, la inversión en equipos e instalación respectiva, los costos de depreciación, los cargos operacionales y de mantenimiento que pueda generar esta implementación, etc., aspectos que solo mediante un proyecto de eficiencia energética se podrá apreciar en su verdadera dimensión, y su incidencia en la viabilidad del mismo proyecto.

Para el estudio del proyecto energético de implementación del variador de velocidad al motor del banco de prueba, se ha tenido en cuenta parte de la metodología estudiada en [35] “El proyecto de eficiencia energética en un sistema de bombeo”, presentada en el marco teórico, anexo A. En la herramienta en Excel, Anexo H, en la tercera hoja nombrada como *proyecto energético implementación AFD*, se muestra el estudio en tres cuadros, el primero *formulación del proyecto* de eficiencia energética, el segundo *flujo de fondos del proyecto* y el tercero, *evaluación financiera del proyecto*.

Se pretende dejar una metodología base para proyectos similares de implementación de variadores de velocidad a motores de bombas centrífugas horizontales para manejo de agua principalmente. Será necesario hacer los ajustes en cuanto a duración de las actividades, costos y demás, debidos al tamaño del sistema de bombeo y por tanto al tamaño del variador requerido. En este informe, en el ítem *descripción de la herramienta en Excel*, se presenta en detalle el procedimiento a seguir para la formulación y evaluación del proyecto.

Se ha decidido realizar el proyecto energético a 10 años, por la depreciación de los equipos, aunque actualmente se proyectan lo más cortos posibles.

A nivel rentabilidad se plantea una tasa de oportunidad del 18 % efectivo anual, que está en línea con tasas actuales en el sector bancario convencional, sin embargo se deja abierta la opción para que el inversionista de acuerdo a su expectativa fije la tasa de oportunidad con que se evalué el proyecto.

5.6.7.1 Formulación del proyecto de eficiencia energética. En la tabla 12, se presenta el cuadro de formulación del proyecto construido en la herramienta en Excel, anexo H, las celdas verdes son para la información suministrada por el usuario. En este cuadro se fijan los parámetros para el proyecto y automáticamente se trasladan los valores de ahorro de energía desde las hojas de la misma herramienta donde se ha calculado éste.

Tabla 12. Cuadro de la herramienta en Excel, para la formulación del proyecto de eficiencia energética

CUADRO FORMULACION DEL PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA										
Base salarial		Salario (\$)	Prestaciones (%)	Total salario (\$)	Valor hora efec. (\$)					
Ingeniero		3.500.000	50%	5.250.000	27.344					
Diseñador		3.000.000	50%	4.500.000	23.438					
Tecnólogo		1.400.000	50%	2.100.000	10.938					
Técnico		1.000.000	50%	1.500.000	7.813					
Otros parámetros										
Inflación %	5%									
Ahorro Kv/H/año	1.646,36									
Ahorro Kv/H/mes	137,20									
Costo Kv/H (\$)	290,00									
Depreciación anual activo	10,00%									
Depreciación mensual activo	0,833%									
Elementos económicos del proyecto	Actividad	Recurso Humano	Cantidad	Mano de obra Hora (\$)	Tiempo empleado (horas/mes)	Tiempo cronológico (meses)	Equipos costo (\$)	Materiales (\$/mes)	Mantenimiento (\$)	Ahorro mes
Costo de desarrollo	Diseño	Ingeniero	1	27.344	5					
		Diseñador		23.438				100.000		
		Tecnólogo	1	10.938	5					
		Técnico	1	7.813	5					
Costo de Montaje	Instalación	Ingeniero	1	27.344	4					
		Diseñador		23.438			600.000	400.000		
		Tecnólogo	1	10.938	5					
		Técnico	2	7.813	20					
Costo de Justificación	Investigación interna	Ingeniero	1	27.344	5					
		Diseñador		23.438						
		Tecnólogo		10.938						
		Técnico	1	7.813	10					
Costo de Producción	mantto 3 limp. año *1hra	Ingeniero		27.344						
		Diseñador		23.438						
		Tecnólogo		10.938						
		Técnico	1	7.813	0,25			2500		
Ingresos	Ahorros									

Fuente: El autor

Entre la información requerida a suministrar esta: mano de obra para las diferentes etapas del proyecto en cuanto a clase y cantidad, tasa de oportunidad, en este caso se fija en 18% efectivo anual, ya que es un proyecto pequeño, valor de kWh, porcentaje de depreciación anual, en este caso se toma lo reglamentario, para maquina 10 años, por tanto la depreciación anual es el 10%, costos de equipos y materiales, así como de producción.

5.6.7.2 Flujo de fondos del proyecto. En la tabla 13, se presenta el flujo de fondos del proyecto, construido en la herramienta en Excel, anexo H, la metodología utilizada esta explicada en el marco teórico, anexo A.

Tabla 13. Cuadro de la herramienta en Excel para el flujo de fondos del proyecto de eficiencia energética

FLUJO DE FONDOS DEL PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA												
Concepto	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
Costo de desarrollo												
Diseño proyecto energético												
m.o	230,469											
materiales	100,000											
Subtotal (-)	330,469											
Costo de montaje												
m.o.		476,563										
Equipos		600,000										
materiales		400,000										
Subtotal (-)		1,476,563										
Costo de justificación												
Investigación intena												
m.o.	214,844											
Subtotal (-)	214,844											
Costo de producción												
Mantenimiento												
m.o.			1,953	1,953	1,953	1,953	1,953	1,953	1,953	1,953	1,953	2,051
materiales			2,500	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500	2,625
Depresiación			5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,250
Subtotal (-)			9,453	9,453	9,453	9,453	9,453	9,453	9,453	9,453	9,453	9,926
Ingresos												
Ahorro cantidad KWH/mes			137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
Valor KWH (\$)			290	290	290	290	290	290	290	290	290	305
Ahorro total (+)			39,787	39,787	39,787	39,787	39,787	39,787	39,787	39,787	39,787	41,776
Flujo neto	-545,313	-1,476,563	30,334	30,334	30,334	30,334	30,334	30,334	30,334	30,334	30,334	31,851

Fuente: El autor

El proyecto es para 10 años de vida útil. Los cinco elementos que componen el flujo de fondos de acuerdo a la metodología empleada son, costos de desarrollo, montaje, justificación y producción y los ingresos. Estos elementos se calculan automáticamente en la herramienta a partir de la información suministrada en la formulación del proyecto.

Es clave tener en cuenta que la construcción de flujo de fondos se realiza a partir de la situación actual del sistema estudiado, por lo cual solo se debe tener en cuenta la información de lo que causa y genera la implementación de la mejora, sus requerimientos y sus efectos desde el punto de vista de flujos de dinero desde el proyecto hacia fuera, que son los egresos, como desde afuera hacia adentro, que son los ingresos o beneficios del proyecto. En la última fila del flujo de fondos se tiene el flujo neto, equivalente a la sumatoria de todos los flujos en cada período y se convierte en la base para la evaluación financiera del proyecto

Con base en las pruebas realizadas se sabe que la potencia al freno requerida en el eje de la bomba es pequeña, por lo cual el motor y el variador también consecuentemente son de poca potencia, por lo que las cifras que se observan en el flujo de fondos a nivel de ahorro son también pequeñas, y la inversión comparativamente con este ahorro puede ser un poco grande.

Solo el análisis de viabilidad nos permite ver la conveniencia o no del proyecto energético, a medida que aumenta la potencia del sistema las cifras de ahorro son más significativas. En el siguiente apartado se muestra la Evaluación financiera del proyecto, como base para la evaluación integral del mismo, la cual también forma parte de la herramienta en Excel, anexo H

5.6.7.3 Evaluación financiera del proyecto de eficiencia energética. En la tabla 14, se presenta la evaluación financiera del proyecto realizada en la herramienta en Excel, anexo H. Para realizar la evaluación financiera del proyecto

energético, la herramienta fundamental es el flujo de fondos construido anteriormente. Se aplican automáticamente los tres métodos de evaluación para tener una visión más completa del proyecto: El Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI), el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), estudiados en el marco teórico, anexo A.

Tabla 14. Cuadro de la herramienta en Excel para la evaluación financiera del proyecto de eficiencia energética.

EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO												
Por calculo												
Flujo neto Egresos	-545.313	-1.476.563	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo neto Ingresos	0	0	30.334	30.334	30.334	30.334	30.334	30.334	30.334	30.334	30.334	31.851
Valor Presente VP	-537.843	-1.436.387	29.104	28.706	28.312	27.925	27.542	27.165	26.793	26.426	25.707	26.622
Valor Presente Neto VPN (Cálculo)	49.312											
Por Función de Excel directamente												
Tasa descuento anual (Iea)	18%											
Periodo Proyecto	Mes											
Numero periodos proyecto	120											
Tasa mensual(oportunidad)	1,38884%											
Valor Presente ingresos (VNAI)	\$ 2.023.542											
Valor Presente Egresos(VNAE)	-\$ 1.974.230											
Valor Presente Neto (VPN) Excel	\$ 49.312											
Tasa Interna de retorno	1,44%											
Valor de la inversión	-\$ 2.021.875											
Sumatoria periodos	- 545.313	- 2.021.875	- 1.991.541	- 1.961.207	- 1.930.873	- 1.900.539	- 1.870.205	- 1.839.871	- 1.809.538	- 1.779.204	- 1.748.836	- 1.688.685
Periodo Recuperacion Inversión	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Años recuperacion inversion	5,2											

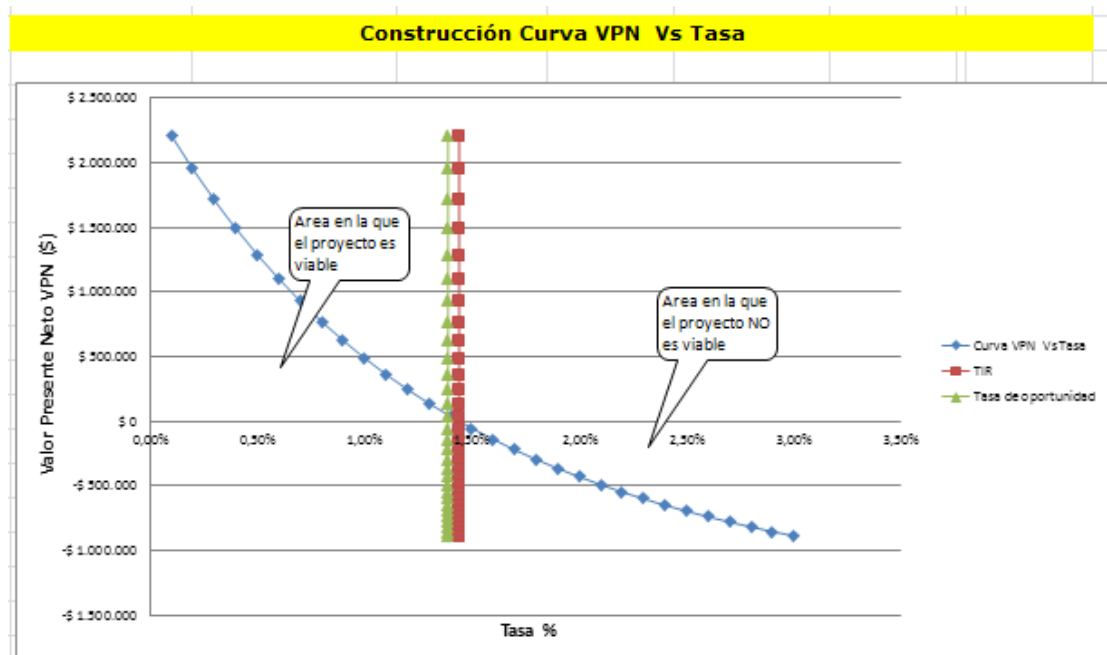
Fuente: El autor

En las celdas verdes se alimenta la información por parte del usuario. El PRI determina en qué período del proyecto los egresos del mismo se igualan a los ingresos. Es recomendable que este PRI sea corto. En la imagen de la tabla 14, se muestra solo una parte de los periodos, son 120, que se tienen en la herramienta en Excel, anexo H. En esta se observa que el PRI es en el mes 62, equivalente cronológicamente a 5.2 años, tiempo que es un poco largo.

En la herramienta se ve la aplicación del método de Valor Presente Neto, VPN, como se observa en la tabla 14, se aplican dos formas, una por calculo y la otra directamente por las funciones financieras de Excel. Con la tasa de oportunidad (tasa de descuento) de 18 % efectivo anual, las dos arrojan el mismo resultado \$49.312, por lo cual aplicando el criterio, $VPN > 0$ (positivo), por tanto el proyecto es viable. Esto quiere decir que el proyecto recupera la inversión a la tasa de oportunidad y deja una ganancia de \$49.312, que no es significativa pero entendible. Entre mayor sea la cifra más confiable es el proyecto financieramente.

Complementariamente se determina la Tasa Interna de Retorno TIR, como se muestra en la herramienta en Excel, Anexo H. se hace directamente por Excel, y su resultado es 1, 44% , que es una tasa pequeña.

Figura 45. Curva VPN Vs. Tasa para la evaluación financiera del proyecto



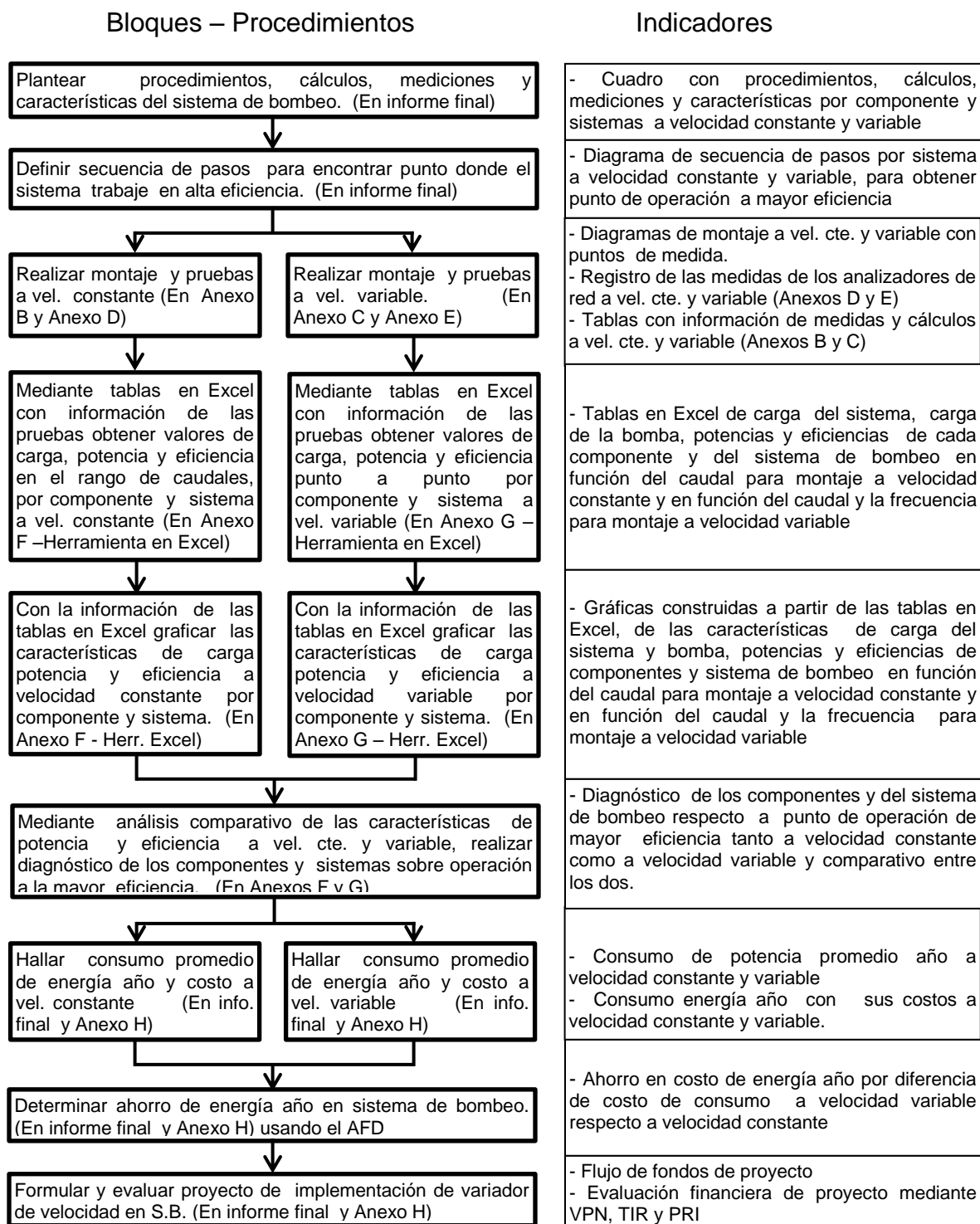
Fuente El autor

Aplicando el criterio, la tasa de oportunidad es $1,38\% < TIR$, por lo cual el proyecto es viable. El gap entre la tasa de oportunidad y la TIR es muy pequeño, entre mayor sea el gap más confiable financieramente será el proyecto.

Por ser un proyecto tan pequeño, las cifras son entendibles, el proyecto es viable, pero finalmente el inversionista o dueño del proyecto toma la decisión de inversión. De la herramienta en Excel, anexo H, se presenta la gráfica 45 en la que se ilustra el comportamiento del VPN en función de la tasa, se puede ver la TIR y se aprecia gráficamente el comportamiento del proyecto financieramente, lo que es muy útil para el inversionista.

5.7 FORMA RESUMIDA - MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE USO DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE BOMBEO

Forma resumida en bloques con procedimientos e indicadores, del modelo para hacer diagnóstico y encontrar el punto de mayor eficiencia del sistema.



5.8 DESCRIPCION DE LA HERRAMIENTA EN EXCEL

A continuación se presenta una breve descripción de los pasos desarrollados en la herramienta en Excel, es una herramienta manual que se fundamenta en la construcción y representación de las características de carga del sistema, carga de la bomba, potencias y eficiencias de cada uno de los componentes de los sistemas de bombeo tanto a velocidad constante como a velocidad variable y su comparación, para lograr mediante el análisis de éstos, hacer el diagnostico de los componentes y sistemas, encontrar el punto o sector de mayor eficiencia energética debido a la acción del variador de velocidad AFD, formular y evaluar el proyecto de implementación de dicho variador de velocidad.

La herramienta se presenta en tres archivos en Excel como Anexos, y trata de seguir en secuencia el paso a paso del modelo desarrollado en el proyecto. En el Anexo F, la aplicación a velocidad constante, esto es sin variador de velocidad a nivel de construcción de tablas y sus graficas correspondientes para los componentes del sistema de bombeo. En el anexo G, la aplicación a velocidad variable mediante el variador de velocidad o AFD, también a nivel de construcción de tablas con sus respectivas gráficas para los componentes del sistema de bombeo, y en el Anexo H, la determinación del ahorro de energía debido al uso del variador de velocidad, con su correspondiente proyecto de eficiencia energética y estudio de viabilidad.

Para cada componente del sistema de bombeo se construyen tablas de datos en una misma hoja en Excel, que se alimentan tanto por parte del usuario con información proveniente de las mediciones y pruebas, como con los resultados de los cálculos requeridos. La información suministrada por el usuario va en las celdas de color verde.

Con las tablas completas se procede a la construcción de las gráficas o características respectivas, para hacer los análisis y comparaciones, lo que permite hacer el diagnóstico y encontrar el punto de mayor eficiencia.

Para mayor claridad en la descripción de los pasos de la herramienta, en cada tabla y gráficos de los anexos F, G y H, se indica el número del paso descrito dentro de un rectángulo

5.8.1 Pasos de la Herramienta en Excel a velocidad constante.

Esta información se presenta en el Anexo F. En una misma hoja, de derecha a izquierda, en el mismo sentido que están ubicados los componentes del sistema de bombeo, desde la carga hacia la acometida se van construyendo las tablas para cada uno de los componentes del sistema, Debajo de las tablas se construyen las diferentes características con sus comparaciones para el respectivo análisis.

5.8.1.1 Determinar la curva Caudal Q Vs velocidad n de la bomba. Esta es una medición previa conveniente para definir el caudal del punto de operación de referencia para el estudio del sistema de bombeo. En ese punto se da el corte de la característica de la bomba con la característica de carga del sistema. Se construye una tabla Q Vs n, se halla la característica y se escoge un punto en el codo de saturación.

5.8.1.2 Determinar la característica de carga del sistema H_s . Es equivalente a la suma de la carga estática y la carga dinámica, las cuales previamente se deben calcular por separado y luego se suman para lograr definir la característica $H_s = J + kQ^2$

5.8.1.2.1 Determinar la carga estática J. Es una constante, previamente se debe conocer el sistema bomba – instalación hidráulica de la carga, sus

características constructiva y dimensiones, se debe definir las constantes del sistema y del fluido, esto es, peso específico, densidad, viscosidad y gravedad, el punto de succión Z_1 y el punto de descarga Z_2 , así como los respectivos caudales, diámetros, áreas y velocidades para estos dos puntos. Aquí se construyen cuadros de datos con toda esta información. Finalmente, aplicando la ley de conservación de la energía y las condiciones de la prueba, se calcula J como el ΔZ , esto es, $J = Z_2 - Z_1$, en una celda al final de uno de los cuadros

5.8.1.2.2 Determinar la carga dinámica kQ^2 . Se debe calcular la constante k , que es la suma de las pérdidas por fricción en las superficies internas de los ductos de la instalación hidráulica y las pérdidas por fricción en los accesorios de la misma. Para calcular las primeras pérdidas, se definen los tramos de la instalación hidráulica, sus longitudes, diámetros de tubería, se calculan las áreas transversales correspondientes y con el caudal de referencia se calculan las velocidades lineales del flujo, luego se calcula el número de Reynolds y con éste se halla el coeficiente de fricción por tubería λ para cada tramo, cuyo producto con la relación de longitudes y diámetros da la pérdida por fricción superficial por tramo, cuya sumatoria da el primer sumando de la constante k .

Para hallar las pérdidas por fricción en los accesorios se determinan y clasifican los diferentes accesorios por tramo, por tabla se halla su correspondiente coeficiente de pérdidas ξ . La sumatoria de los productos de estos coeficientes por el número de accesorios da las pérdidas por tramo y su sumatoria da el segundo sumando de la constante k .

Se construye una tabla con los tramos y la información descrita, en la celdas verdes se registra la información suministrada por el usuario. Al final de ésta se calcula el valor de k con la cual se obtiene la carga dinámica kQ^2 de la característica de carga del sistema.

Ahora ya se tiene la ecuación de la característica de carga del sistema $H_s = J + kQ^2$, que se utiliza en otra tabla para hallar los valores de H_s en función del caudal Q y así se construye la característica correspondiente. Los valores de

carga del sistema H_s se muestran en dos columnas, una en metros y la otra en pies, el caudal Q se muestra en gpm.

5.8.1.3 Determinar la característica de carga de la bomba H_b . Tiene una carga estática a y una carga dinámica cQ^2 , las cuales previamente se deben calcular por separado para luego obtener la ecuación de la característica $H_b = a - cQ^2$

5.8.1.3.1. Determinar la carga estática a de la bomba. Se parte de la ecuación de conservación de la energía. Como solo se analiza la bomba se cumple que $Z_1 = Z_2$, entonces se anulan, $v_1 = v_2$, también se anulan y las pérdidas por fricción no existen porque solo se toma la bomba. Por lo anterior queda que $H_b = \Delta P / \gamma$, y como $H_b = a - cQ^2$, para hallar a $Q = 0$, entonces $a = \Delta P / \gamma$, se utilizan los factores de proporcionalidad para obtener el valor de a inicialmente en metros y luego se convierte a pies. Para este paso se construye un cuadro con la información relacionada.

5.8.1.3.2 Determinar la carga dinámica cQ^2 de la bomba. Ya se ha calculado la carga estática a de la bomba, por lo cual de $H_b = a - cQ^2$ se despeja el valor de c como $c = (a - H_{op}) / Q_{op}^2$, donde (H_{op}, Q_{op}) es el punto de operación tomado como referencia y se usan los factores de conversión correspondientes. Ahora ya se tiene la carga estática cQ^2 con lo cual se logra la ecuación de la característica de carga de la bomba $H_b = a - cQ^2$, que se utiliza en la misma tabla de la característica de carga del sistema, allí se hallan los valores de H_b en función del caudal Q y así se construye la característica correspondiente. Los valores de carga de la bomba H_b se muestran en dos columnas, una en metros y la otra en pies, el caudal Q se muestra en gpm.

5.8.1.4 Determinar la potencia útil de la bomba P_{util} . Esta es igual a $P_{util} = \gamma Q H_b$, se tiene definido en una celda el valor del peso específico γ ; de otra parte, en la tabla de las características de la bomba y carga del sistema, se tienen en la primera columna en forma ascendente los valores de caudal Q aforados para varios puntos, en otras columnas los valores de la carga de la bomba H_b en metros y pies, con estos valores se calcula para cada punto de caudal la potencia útil correspondiente tanto en Watts como en hp y se presentan en la tabla de características de la bomba donde también se presentan los datos de potencia en el eje y eficiencia de la misma.

Con los datos de potencia útil de la bomba y caudal se construye la característica P_{util} Vs Q para analizar su comportamiento.

5.8.1.5 Determinar la potencia al freno o potencia en el eje de la bomba P_{eje} . Esta es igual a $P_{eje} = ((T * n) / (726 * 1000)) * 746$, el par T para cada punto de caudal se calcula con base en las pruebas realizadas al motor, al que se ha implementado un brazo torsor de 0,222 metros y ejerce una fuerza que se mide en una balanza digital, estas mediciones se registran en una columna de la tabla de características de la bomba, en otra columna de la misma tabla se registra la velocidad medida que permanece constante, el producto de la longitud del brazo por la fuerza medida en cada punto es el par T que se presenta en otra columna. Con los datos de par y de la velocidad y las constantes de proporcionalidad se calcula la potencia en el eje para cada punto y se expresa en hp, con estos datos se construye la característica P_{eje} Vs Q para el correspondiente análisis.

5.8.1.6 Determinar la eficiencia de la bomba η_b . Esta equivale a $\eta_b = (P_{util} / P_{eje}) * 100$, con las potencias útil P_{util} y en el eje P_{eje} ya calculadas para cada punto de caudal, se calcula la eficiencia de la bomba en otra columna de la tabla de características de la bomba y se construye su gráfica correspondiente.

Con base en el análisis de las características definidas de la bomba se puede hacer parte del diagnóstico. De la eficiencia de la bomba se puede saber el sector y punto de máxima eficiencia de la misma, a velocidad constante. La gráfica de la potencia de la bomba puede indicar de que orden realmente se requiere el motor para la misma a velocidad constante y se aplica un factor de seguridad del 10%, lo que se muestra en la tabla precedente al acople motor.

5.8.1.7 Determinar la eficiencia del acople motor bomba η_{amb} . La eficiencia del acople es proporcional a $\eta_{acop} \propto (T_{res} * n_{eje b}) / (T_m * n_{eje m}) < 1$, se debe cumplir $n_{eje m} = n_{eje b}$ y $T_{res} < T_m$. El par del acoplamiento depende del par resistente de la bomba y del par motor, entonces se calcula a partir de potencia del motor que alimenta el usuario, aplicándole un factor de seguridad del 80%. Para garantizar máxima transferencia de potencia, el par de catalogo del acople a utilizar debe ser bastante superior al par del acoplamiento calculado. Como no se dispone de un sistema para medir o calcular las perdidas en el acople, se toma como referente la eficiencia determinada en [30] para estos acoples que es del 98% constante en función del caudal, siempre que se cumpla la condición citada. Esta información se presenta en la tabla de Excel para el acople.

5.8.1.8 Determinar la eficiencia del motor de inducción η_m . Esta se halla por dos métodos, el primero por mediciones directas, $\eta_m = P_{sal} / P_{ent.}$, se mide tanto la potencia de entrada $P_{ent.}$, como la potencia de salida P_{sal} en función del caudal Q , estos datos los ingresa el usuario en las celdas verdes de la tabla de eficiencia del motor. El segundo método es en forma indirecta por cálculo de las perdidas, mediante la ecuación $\eta_m = (1 - (Perd.tot.mot/P_i)) * 100$, la potencia de entrada al motor P_i es la potencia nominal a la entrada, mientras que las pérdidas totales del motor $P_{erd.tot.mot}$ se calculan por el método de separación de pérdidas.

5.8.1.8.1 Determinar las pérdidas totales del motor $P_{erd.tot.mot}$ por el método de separación de pérdidas. Este método clasifica las pérdidas en cuatro grupos, para su cálculo se requieren varias mediciones y se registran en sus tablas correspondientes:

5.8.1.8.1.1 Pérdidas en el cobre del estator P_{cue} . Equivalen a $P_{cue} = 3 * R_f * I_f^2$, el valor de la resistencia de fase se determina por cálculo de acuerdo a la conexión y se verifica por medición, luego se ajusta por temperatura de acuerdo a las pruebas para cada uno de los caudales, en estas mismas se toma el dato de la corriente de fase de las mediciones con el analizador de redes, y se registran en las celdas verdes de su tabla, en la cual se calcula el valor de pérdidas en el cobre del estator para cada punto.

5.8.1.8.1.2 Pérdidas en el hierro y pérdidas mecánicas $P_{fe} + P_{fw}$. Estas pérdidas equivalen a $P_{fe} + P_{fw} = (3,5 - 4,2\%)P_i$, donde P_i es la potencia de entrada nominal del motor, que es un valor constante para todos los caudales de prueba. Se toma el menor porcentaje de 3,5% por ser un motor de muy baja potencia, por lo tanto estas pérdidas son las mismas para todos los puntos y se calculan en la tabla correspondiente.

5.8.1.8.1.3 Perdidas adicionales en carga P_{LL} . Que equivalen a $P_{LL} = (K\%)P_n$, donde P_n corresponde a la potencia nominal del motor y es el mismo valor para todos los puntos de caudal, el porcentaje es por tabla y depende de la potencia de placa del mismo, que corresponde a 1.8%, por lo cual el cálculo de estas pérdidas da el mismo valor para todos los puntos y se presenta en su tabla.

5.8.1.8.1.4 Pérdidas en el cobre del rotor P_{cur} . Que son equivalentes a $P_{cur} = S * P_{agr}$, donde el deslizamiento S se calcula como $S = (ncg - nr) / ncg$, con la velocidad de campo giratorio ncg constante, con valor de 3600 rpm

ya que el motor es de dos polos y la velocidad del rotor n_r es medida para cada punto de caudal pero a velocidad constante, esta el usuario la registra en la tabla para estas pérdidas en la columna de celdas verdes. La potencia que llega al rotor P_{agr} , se determina por $P_{agr} = P_i - P_{cuc}$, donde la potencia de entrada nominal del motor P_i es el mismo valor para todos los puntos de caudal y las perdidas en el cobre del estator ya fueron calculadas también para cada punto, con lo cual se calculan las perdidas en el cobre del rotor en función del caudal en su correspondiente tabla.

Cada perdida se ha calculado en su correspondiente tabla, ahora se suman y se obtiene las perdidas totales del motor, cálculo que se registra en otra columna de una nueva tabla, en la que también se calculan las perdidas por medición directa de las potencias de entrada y salida del motor y se hace su comparación

Con estos dos métodos se calcula la eficiencia del motor por el método de separación de perdidas y por medición directa, en función del caudal en dos columnas en otra tabla y se grafican sus características para el análisis respectivo.

5.8.1.9 Determinar la eficiencia del Centro de Control de Motores o arrancador η_{MCC} . Esta se logra mediante la relación de las mediciones directas de la potencia de salida sobre la potencia entrada del arrancador en función del caudal y se calculan las pérdidas del arrancador. Los datos se registran en la tabla correspondiente, que permite construir la característica de eficiencia respectiva.

5.8.1.10. Determinar las pérdidas en conductores eléctricos P_{ce} . Estas se calculan por $P_{ce} = 3 * I^2 * R$, para cada tramo entre componentes del sistema. I es la corriente promedio de fase en función del caudal, el usuario la registra en la columna verde de la tabla de perdidas de conductores, la resistencia de los conductores se mide o se calcula por tabla en función del calibre y longitud.

Con el objeto de no alterar las instalaciones entre velocidad constante y velocidad variable se han dejado instaladas las resistencias shunt, necesarias para velocidad variable, pero no para velocidad constante, se calcula su potencia de perdidas y se registra en una columna. Finalmente las potencias de perdidas en conductores para cada tramo se suman y se registran en otra columna.

5.8.1.11. Determinar la eficiencia del sistema de bombeo completo η_{SB} .

Esta se calcula de dos formas, la primera como la relación entre la potencia de salida del sistema de bombeo y la potencia de entrada al mismo, datos que ya se tienen. La segunda como el producto de todas las eficiencias de los componentes $\eta_{SB} = \eta_b * \eta_{amb} * \eta_m * \eta_{MCC}$, que ya han sido calculadas. Se registran en la tabla respectiva, se comparan entre si y se construye la gráfica que muestra todas las eficiencias para su análisis.

En este punto se termina la aplicación de la herramienta en el Anexo F respecto a la construcción de tablas y gráficas correspondientes a los componentes del sistema a velocidad constante (sin variador de velocidad)

5.8.2 Pasos de la Herramienta en Excel a velocidad variable.

Esta información se presenta en el Anexo G. Aquí se adiciona al sistema de bombeo el variador de velocidad por frecuencia o AFD. y se procede exactamente igual que en el sistema a velocidad constante, teniendo en cuenta las nuevas condiciones debidas a la implementación del variador de velocidad en el sistema. Adicionalmente, cuando ya se tiene todo el sistema estudiado, se construyen características de potencia y eficiencias de los dos sistemas a velocidad constante y variable para su fácil comparación, análisis y diagnóstico.

5.8.2.1 Determinar la curva Caudal Q Vs velocidad n de la bomba. Aplica la misma gráfica que para velocidad constante, esta es una prueba previa común y necesaria para el estudio de los dos sistemas a velocidad constante y variable.

5.8.2.2 Determinar la característica de carga del sistema H_s . Por tener la bomba un comportamiento muy similar a nivel de presiones de succión y descarga entre funcionamiento a velocidad variable y a velocidad constante, lo cual da que los caudales prácticamente sean los mismos, las curvas de carga del sistema y carga de la bomba son prácticamente las mismas, por lo cual la característica de carga del sistema a velocidad variable será la misma que la obtenida a velocidad constante. El procedimiento utilizado es exactamente el mismo teniendo en cuenta la variación de la frecuencia-caudal, se construye la tabla correspondiente y su característica.

5.8.2.3 Determinar la característica de carga de la bomba H_b . Por lo enunciado en el punto anterior respecto a la característica de carga del sistema, la característica de carga de la bomba también es la misma que la obtenida a velocidad constante. Se sigue el mismo procedimiento observando la variación de la frecuencia –caudal, se construye la tabla y su característica.

5.8.2.4 Determinar la potencia útil de la bomba P_{util} . Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para determinar la potencia útil de la bomba a velocidad constante, se calcula la potencia útil de la bomba a velocidad variable, en las dos columnas del extremo izquierdo se enlista las frecuencias y los respectivos caudales en forma ascendente. Con los valores de γ , Q y H_b se calcula la potencia útil de la bomba para cada punto, se expresa en vatios y en hp utilizando el factor de conversión, luego se construye la característica P_{util} Vs Q para analizar su comportamiento.

5.8.2.5 Determinar la potencia al freno o potencia en el eje de la bomba P_{efe} . Se determina en la misma tabla de Potencia útil de la bomba siguiendo el mismo procedimiento utilizado para determinar la potencia al freno a velocidad constante, pero tomando como referente los nuevos caudales resultados de la variación de frecuencia. Se expresa en vatios y en hp, con sus valores se

construye su característica en función del caudal y la frecuencia P_{eje} Vs (Q, Hz) y analiza su comportamiento. Complementariamente para el análisis se construye la característica donde se comparan las potencias en el eje de la bomba tanto a velocidad constante como a velocidad variable en función del caudal y frecuencia, en la que se observa el efecto del variador de velocidad.

5.8.2.6 Determinar la eficiencia de la bomba η_b . Teniendo en cuenta el mismo procedimiento utilizado para determinar la eficiencia de la bomba a velocidad constante, se determina la eficiencia de la bomba a velocidad variable tomando como referentes las frecuencias y caudales correspondientes, en la misma tabla de potencia útil de la bomba y se construye su característica. Complementariamente para el análisis se construyen graficas donde se compara la eficiencia de la bomba con las otras características de la misma y del sistema, lo que contribuye al diagnóstico.

5.8.2.7 Determinar la eficiencia del acople motor bomba η_{amb} . Para su calculo se procede exactamente como el análisis para velocidad constante, teniendo en cuenta que el único parámetro que varía es la potencia solicitada por la carga en el eje de la bomba, esto debido a la variación en el consumo de la bomba por efecto de la variación de la velocidad. Sin embargo Como no se dispone de un sistema para medir o calcular las perdidas en el acople, adicionalmente el factor de servicio tenido en cuenta en la selección del momento torsor del acople según catalogo respecto al momento torsor del acoplamiento es bastante grande y por lo determinado en [30] se mantiene constante la eficiencia en el acople en 98% en función del caudal y la frecuencia.

5.8.2.8 Determinar la eficiencia del grupo variador de velocidad AFD - Motor *Efic.AFD – motor*. El grupo variador de velocidad – motor se toma como una caja negra, debido al gran contenido armónico de la señal de tensión entregada por el variador al motor, por lo cual no es posible una medición efectiva de los

parámetros de salida del variador y entrada al motor. La eficiencia del grupo se calcula mediante la siguiente relación,

$$Efic.AFD - motor = \frac{\text{Potencia en el eje}}{\text{Total de potencia eléctrica consumida por el AFD}} * 100, \text{ ya se tiene}$$

determinada la potencia en el eje en función de la velocidad y frecuencia, se registra en una de las columnas de la tabla respectiva. La potencia eléctrica consumida por el AFD en función de la velocidad y frecuencia es medida mediante un analizador de redes y registrada por el usuario en la tabla en la columna verde. Calculada la eficiencia del grupo motor-variador, se construye su característica correspondiente para hacer los análisis y comparaciones necesarias para contribuir con el diagnóstico.

5.8.2.9 Determinar la eficiencia del Centro de Control de Motores o arrancador η_{MCC} . De la misma forma que se procedió para velocidad constante, se calcula la eficiencia del MCC o arrancador para velocidad variable, en forma directa, mediante la relación de las potencias medidas de salida y entrada del MCC o arrancador en función del caudal y la frecuencia, las cuales son suministradas por el usuario en las columnas verdes de la tabla, se determinan las pérdidas, se calcula la eficiencia y los valores son almacenados en la tabla respectiva, con los cuales se construye la característica de eficiencia del MCC o arrancador.

5.8.2.10 Determinar las pérdidas en conductores eléctricos P_{ce} . Las pérdidas en conductores para cada tramo entre componentes se debe calcular como $P_{cef} = 3 * I^2 * R$, donde I es la corriente de fase promedio que alimenta el usuario en la segunda columna verde de la tabla de pérdidas en conductores y R es la resistencia del conductor medida o calculada por tabla en función del diámetro y longitud. Se debe tener en cuenta la potencia de pérdidas de cada una de las resistencias shunt que se instalaron para poder medir la forma de onda de la tensión que entrega el variador de velocidad, ésta se calcula por fase como

$P_{res.med.} = I^2 * R$, donde I es la corriente de fase y R es la resistencia shunt medida, la suma de las tres potencias por fase da la potencia del conjunto de resistencias de medida, este valor lo alimenta el usuario en la primera columna verde del lado izquierdo de la tabla de pérdidas en conductores, este es un caso especial por tratarse de dispositivos necesarios para realizar las pruebas, cuya potencia de perdidas se resta de la potencia total consumida.

5.8.2.11 Determinar la eficiencia del sistema de bombeo completo η_{SB} .

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para velocidad constante, se aplica para velocidad variable, en la cuarta columnas de la tabla de eficiencias del sistema de bombeo va la potencia de salida del sistema – potencia útil, calculada en función del caudal y la frecuencia, la tercera columna, la verde, es alimentada por el usuario con la potencia total consumida, medida con el analizador de redes, en la segunda columna se calcula la eficiencia por el método directo de división entre la potencia útil y la potencia de entrada y en la primera columna se calcula la eficiencia por el método del producto de las eficiencias de los componentes del sistema de bombeo, eficiencias que ya han sido calculadas. Con base en esta tabla se construyen varias gráficas que permiten complementar el diagnóstico, una de estas, compara la potencia total consumida con variador de velocidad y sin variador de velocidad en función del caudal y la frecuencia, la cual permite observar la disminución substancial de potencia consumida debido al uso del variador de velocidad, otra grafica compara todas las eficiencias de los componentes y la del sistema completo a velocidad variable, otra gráfica , de las que más aporta para el diagnóstico, compara las curvas de carga del sistema, y de la bomba, las potencias totales consumidas con y sin variador de velocidad y las eficiencias totales del sistema con y sin variador, de ésta se obtienen las principales conclusiones respecto al uso del variador de velocidad por frecuencia, el consumo de energía y el punto de operación de mayor eficiencia del sistema de bombeo entre otros.

En este punto se termina la aplicación de la herramienta en el Anexo G respecto a la construcción de tablas y gráficas correspondientes a los componentes del sistema a velocidad variable (con variador de velocidad AFD).

5.8.3 Determinación del ahorro de energía y proyecto de eficiencia energética

Esta parte de la herramienta en Excel se muestra en el anexo H, y pretende determinar el ahorro de energía por año logrado con el uso del variador de velocidad AFD en el sistema de bombeo, tomando las pruebas realizadas como referente y como estas fueron hechas en un banco de pruebas, se simulan los perfiles de caudal consumido año.

Luego se formula el proyecto de eficiencia energética consistente en la implementación del AFD, el ahorro de energía se toma como ingresos del proyecto y se realiza el estudio de viabilidad respectivo.

El Anexo H tiene tres hojas de cálculo. En la primera se halla el ahorro de energía con el uso del variador de velocidad con un perfil de consumo normal de proceso, en la segunda se halla el ahorro de energía con el uso del variador de velocidad, pero teniendo en cuenta un perfil de consumo de caudal año que incluya principalmente el punto y sector de mayor eficiencia del sistema de bombeo determinado en las pruebas. En la tercera hoja se presenta el proyecto energético de implementación del variador de velocidad, se formula el proyecto con su flujo de fondos respectivo y se realiza el estudio de viabilidad mediante los métodos de Valor Presente Neto VPN, Tasa Interna de Retorno TIR y Período de Recuperación de la Inversión PRI.

5.8.3.1 Determinación del ahorro de energía con el variador de velocidad y un perfil de consumo de caudal año normal de proceso. Esta se realiza en la primera hoja de cálculo del Anexo H marcada como “Ahorro perfil consumo normal proceso”. Como la investigación se ha realizado en un banco de prueba, el perfil

de consumo de caudal año se simula usando los caudales de prueba. El ahorro de energía se da por la diferencia entre el consumo de energía año a velocidad constante y el consumo de energía año a velocidad variable.

Se construye una tabla para calcular la potencia eléctrica promedio año a velocidad constante y otra para hacer lo propio a velocidad variable. En cada una de las tablas, el usuario registra la información que corresponda en las columnas verdes. En la tabla a velocidad variable adicionalmente se indica en las dos primeras columnas la frecuencia y la velocidad respectivamente para cada caudal.

En las columnas de *caudal (gpm)* el usuario debe registrar los caudales año que maneja el proceso, que en este caso a nivel de simulación se registran 8 datos, correspondientes a caudales manejados en las pruebas realizadas y sobre los cuales se tienen datos de las mediciones.

En las columnas *tiempo por caudal año (%)*, se debe registrar el porcentaje del tiempo al año que cada caudal es manejado por el proceso, que para efectos de la simulación, se coloca un perfil cualquiera con mayores porcentajes de tiempo en los caudales más altos.

En las columnas de *potencia al freno por caudal (BHP)*, se debe registrar la potencia en el eje del motor ya calculada con base en las mediciones. Esta es la potencia mecánica entregada al eje de la bomba por cada caudal.

En la columna *factor de η componentes hasta BHP (%)*, se registra el producto de las eficiencias de los componentes del sistema de bombeo desde la acometida hasta la salida del motor, esto es, las eficiencias del MCC o arrancador y del motor, para el sistema a velocidad constante. Para el sistema a velocidad variable es el producto de las eficiencias del MCC o arrancador y del conjunto variador velocidad – Motor.

En las columnas de *potencia eléctrica por caudal (hp)*, se calcula la potencia eléctrica total consumida por los componentes del sistema para cada caudal, es el cociente de la división entre la potencia al freno y el factor de eficiencias calculado anteriormente. Estos valores coinciden con la medida de potencia total consumida en las pruebas para cada caudal.

En las últimas columnas, *peso de potencia por caudal anual (hp)*, se calcula el peso anual de cada potencia eléctrica determinada previamente, multiplicándola por el respectivo porcentaje de *tiempo por caudal año*, la sumatoria de estas potencias indica la potencia eléctrica promedio año en cada tabla, en una a velocidad constante en la otra a velocidad variable. Con estas potencias a continuación se calcula el ahorro de energía.

5.8.3.1.1 Cálculo de ahorro de energía. En la misma hoja se construye una tercera tabla en la cual se calcula el costo del consumo de energía año tanto a velocidad constante como a velocidad variable a partir de los valores calculados previamente de potencia promedio año expresada en hp, los que se multiplican primero por el factor de conversión a vatios, luego por el precio del KW-H, luego por los 365 días del año, y finalmente por las 24 horas del día y se obtiene el costo en pesos (\$). Si se divide este costo de energía por el precio del KW-H se obtiene el consumo de energía en KW-H. El ahorro de energía se da por la diferencia entre el consumo de energía año a velocidad constante y el consumo de energía año a velocidad variable, tanto en KW-H como en pesos (\$). Para el perfil simulado el ahorro dio de 23.44%.

5.8.3.1.2 Cálculo del ahorro promedio año. En la cuarta tabla de la hoja, se pretende calcular el ahorro promedio año, tomando como referente 10 años de vida útil de un equipo (AFD). No se tiene en cuenta el costo del equipo ni su instalación y solo se considera el ahorro logrado por la acción del AFD en los 10 años, teniendo en cuenta que el dinero en el tiempo tiene un costo.

El ahorro de energía por año calculado anteriormente, es llevado a la columna de *valor presente del ahorro* durante los 10 años y el usuario registra en la columna verde *tasa de oportunidad* la tasa de descuento con que se debe evaluar este ahorro.

En la cuarta columna se calcula el valor futuro del ahorro por año a la tasa de descuento, se halla el promedio durante los 10 años de este valor futuro, el cual representa el promedio de ahorro por año. Complementariamente se calcula el ahorro durante los 10 años en valor presente y en valor futuro.

Este cálculo presentado así, permite visualizar el ahorro a nivel energético que se obtendría por la acción del AFD, pero debe tenerse en cuenta todos los costos ocasionados por su adquisición, instalación, mantenimiento y operación, por lo cual la decisión de su implementación debe ser resultado del estudio de viabilidad del proyecto de ahorro energético completo, el cual se presenta más adelante.

5.8.3.2 Determinación del ahorro de energía con el variador de velocidad y un perfil de consumo de caudal año de mayor eficiencia. Esta se realiza en la segunda hoja de cálculo del Anexo H marcada como “Ahorro perfil consumo>eficiencia”. El procedimiento seguido es exactamente igual al descrito anteriormente para *perfil de consumo normal proceso*. La variante radica en que ahora el sistema, tanto a velocidad constante como a velocidad variable, se simulará con el perfil de consumo de caudal donde las características de eficiencia de las pruebas realizadas indicaron la mayor eficiencia y se pretende estudiar cual es la diferencia a nivel de ahorro de energía entre los dos perfiles de consumo simulados.

Del análisis de las características de eficiencia de las pruebas del sistema, se obtuvo que el punto de caudal de mayor eficiencia a velocidad variable fue 5.02 gpm., alrededor de este punto se tomó un sector de $\pm 15\%$ de caudal donde se

mantiene un alto nivel de eficiencia. Para velocidad constante se tomó los puntos de caudal más aproximados a los valores anteriores donde se registraron datos. De esta manera se asignó un perfil de consumo de caudal año con mayor porcentaje, 25% , en el punto de mayor eficiencia y en los puntos adyacentes se les dio un peso de 20% a cada uno, el 35% restante del consumo se repartió en los niveles de caudal más altos.

Finalmente de la simulación se obtuvo una potencia promedio año a velocidad constante de 0.5209 hp y a velocidad variable de 0.2690 hp, presentando ésta una variación de 99,1% menor que a velocidad constante.

Hallando el costo de energía, el ahorro obtenido como la diferencia entre velocidad variable a velocidad constante fue de 48.36%. Comparando los perfiles de consumo de caudal, el ahorro con perfil de mayor eficiencia fue mayor en 106% que el perfil normal de proceso. El ahorro total a 10 años por el uso del AFD , sin tener en cuenta su implementación fue de \$6.305.509.66 que representa un ahorro adicional del 94.7% trabajando con el perfil de caudal año de mayor eficiencia.

Como se indicó en el apartado anterior, se debe realizar el proyecto de eficiencia energética consistente en la implementación del variador de velocidad con todos sus costos y su correspondiente estudio de viabilidad para tomar la decisión que corresponda, el cual se presenta a continuación.

5.8.4 Proyecto de eficiencia energética.

En la tercera hoja del anexo H marcada como *Proyecto energético de implementación del AFD*, se presenta la aplicación para la formulación y evaluación del proyecto de eficiencia energética.

En la parte superior se tiene una tabla marcada como *cuadro de formulación del proyecto de eficiencia energética*, en este se carga por parte del usuario en las celdas verdes, los salarios de los cargos básicos que pueden intervenir en el proyecto, con su porcentaje de prestaciones sociales respectivo, de la misma forma se cargan los parámetros inflación, valor del KW-H y porcentaje de depreciación de equipos. En la columna de cantidad de recurso humano, se carga el número de personas por cargo involucradas en el proyecto, así como las horas dedicadas al mismo, en la columna de tiempo empleado. En las columnas de costo de equipos y materiales se registra el costo de los equipos y de los materiales directos e indirectos requeridos para la implementación de los mismos. La aplicación calcula los valores de las celdas restantes.

En el siguiente cuadro marcado como *Flujo de fondos del proyecto de eficiencia energética*, se muestra cronológicamente en cada periodo (meses) los egresos e ingresos del proyecto. Automáticamente se calculan, con base en los parámetros dados en el cuadro anterior, los valores correspondientes a cada uno de los cinco conceptos que forman el flujo de fondos del proyecto, esto es, costos de desarrollo, costos de montaje, costos de justificación, costos de producción e ingresos.

Se debe destacar que en cada concepto de costos se calcula el valor de la mano de obra y materiales requeridos respectivamente. En el costo de producción se adiciona el valor de la depreciación. Los ingresos del proyecto son los valores correspondientes a los ahorros de energía generados por el uso del AFD mes a mes. Al final del cuadro se calcula el flujo neto mes a mes, como la suma algebraica de los valores en cada uno de éstos.

Después del flujo neto, hacia abajo, se realiza la evaluación financiera del proyecto. Esta se realiza mediante los tres criterios Valor Presente Neto VPN, Tasa Interna de Retorno TIR y Período de Recuperación de la Inversión PRI.

Cualquiera de los primeros criterios es suficiente para la determinación de la viabilidad del proyecto. En las celdas verdes el usuario registra la tasa anual de descuento, la unidad de los periodos manejados en el proyecto, en este caso mensual, y el número de periodos del proyecto. De la tasa de descuento anual, se calcula la tasa de descuento mensual nominal (tasa de oportunidad), con la que se evalúa el proyecto.

Para aplicar el criterio de VPN se usan dos formas a manera de corroboración, la primera por cálculo y la segunda por funciones financieras directas que trae Excel. En la primera, a cada valor del flujo neto se le calcula su valor presente, luego la sumatoria de todos los valores presentes constituye el valor presente neto VPN del proyecto. En la segunda forma, directamente de las funciones de Excel, se calcula el valor neto anual de los ingresos VNAI y el valor neto anual de los egresos VNAE, su diferencia es el valor presente neto VPN del proyecto. Los valores de VPN obtenidas de las dos formas debe ser el mismo. Con este valor y mediante la función de Excel "SI", se aplica los dos extremos del criterio, que si $VPN > 0$ el proyecto es viable, si $VPN < 0$, entonces el proyecto no es viable. Este dictamen aparece en la celda roja en forma automática.

Para aplicar el criterio de la TIR, se aplica directamente la función de Excel y se calcula dicho valor, y mediante la función de Excel "SI", se aplica los dos extremos del criterio, que si $TIR > i_{op}$ el proyecto es viable, si $TIR < i_{op}$, entonces el proyecto no es viable. Este dictamen aparece en la segunda celda roja automáticamente.

El criterio del período de recuperación de la inversión PRI del proyecto se determina a partir de la sumatoria acumulada de los flujos netos de los periodos, luego mediante una función combinada "SI" y "Y" se determina el periodo (mes) en el cual se recupera la inversión, y a partir de este, a cuantos años equivale. Este dictamen también se hace automáticamente.

Finalmente para mayor entendimiento y conocimiento sobre el comportamiento del proyecto, se construye la curva de VPN Vs Tasa, a partir de su correspondiente tabla de valores, en la que el usuario define en las celdas verdes la serie de valores de tasa a utilizar. La gráfica se construye automáticamente y de la misma forma se indica la tasa de oportunidad y la TIR, con lo cual se corrobora los resultados obtenidos.

6 APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA EN EXCEL EN EL CASO DE UNA TESIS SOBRE UN SISTEMA DE BOMBEO EN INGENIO AZUCARERO.

A continuación se pretende aplicar la herramienta desarrollada en Excel al caso de una tesis de un ingenio azucarero sobre el sistema motor bomba y sistema hidráulico, con los resultados obtenidos, en los cuales se ha medido en campo parámetros de operación. El proyecto de tesis es de maestría titulado: “Evaluación electromecánica y económica de las oportunidades de ahorro energético en los sistemas de bombeo de los ingenios azucareros colombianos” realizado por el estudiante de Maestría en Ingeniería con énfasis en ing. Eléctrica José Andres Chamorro Cuarán, en 2011. Esta validación se presenta utilizando la herramienta en Excel, en el anexo J, por lo cual, para su descripción se referirá a este anexo.

En el proyecto en cuestión se tratan los sistemas de bombeo convencionales controlados por válvula de estrangulamiento para los sistemas de rechazo y de inyección de azúcar refinada. Ambos sistemas están conformados por los conductores eléctricos, motor, bomba y tubería con los accesorios del sistema de carga, a la salida de la bomba está la válvula de estrangulamiento. Se selecciona para la validación, el sistema de inyección de azúcar refinada, a velocidad constante, en el que se tomaron dos puntos de prueba.

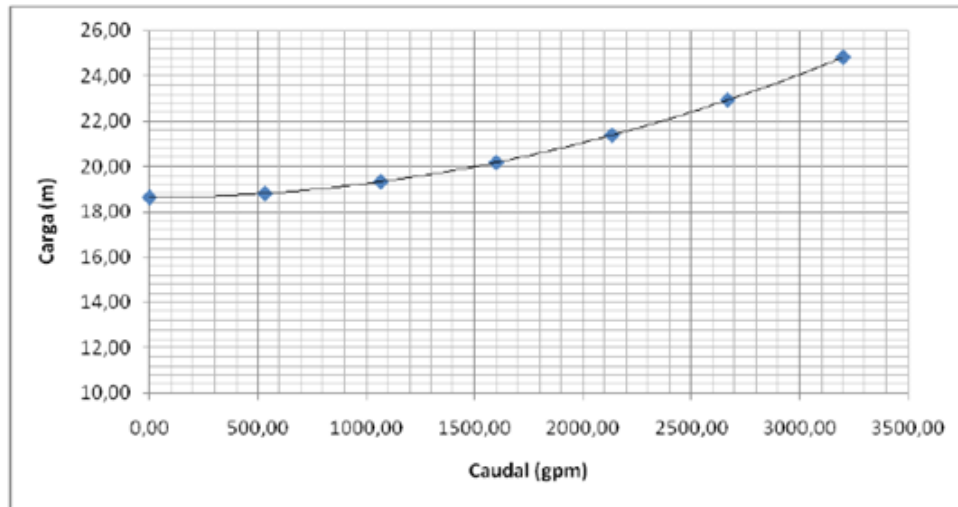
Tabla 15. Tabla con parámetros de caudal y carga de proyecto ingenio.

Caudal (gpm)	CARGA (m)
0,00	18,64
533,33	18,81
1066,67	19,33
1600,00	20,19
2133,33	21,38
2666,67	22,93
3200,00	24,81

Fuente: Proyecto de tesis [40]

En la tabla 15 se presentan un cuadro tomado de la tesis, con la información correspondiente sobre la curva de carga del sistema Vs caudal . En la figura 46 se muestra la correspondiente curva de carga del sistema lograda en la tesis.

Figura 46. Curva de carga del sistema bomba de inyección – azúcar refinada



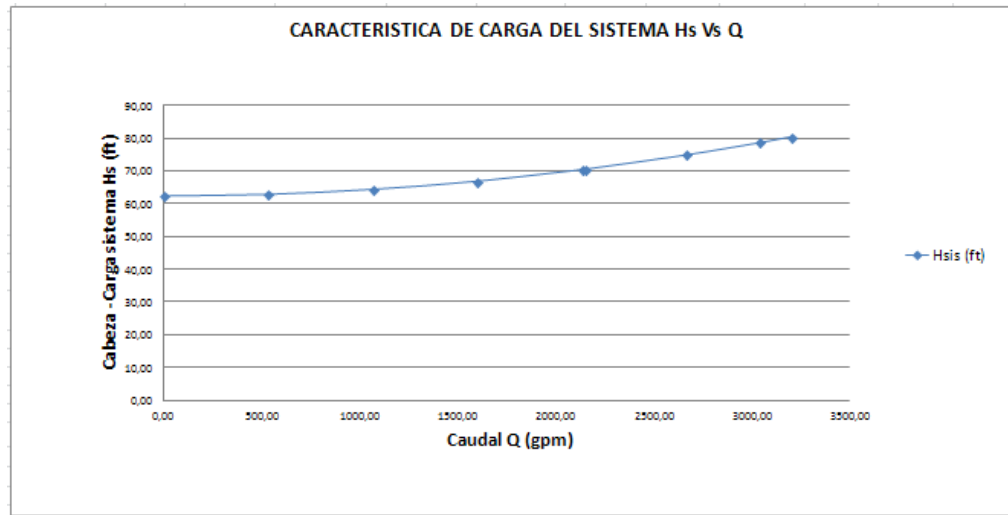
Fuente: Ibíd. p 148

Con la información de las características del sistema hidráulico se aplica en la herramienta en Excel, anexo J, y se obtiene también la característica del sistema de carga y coincide con la de la tesis, como se muestra en la figura 47, en la herramienta en Excel la carga se representa en pies, pero los valores son equivalentes a los de la tesis en metros.

Para la construcción de la característica de carga de la Bomba, siguiendo el modelo, se requiere el delta de presiones entre la descarga de la bomba y la succión. En el proyecto de la tesis no se midió presión de succión, por lo cual se tuvo que asumir una primera aproximación, y fue tomar el delta de presiones entre los puntos 1 2 del sistema como aproximadamente igual al delta de presiones de la bomba, para poder construir la característica. En la figura 48 se muestra la

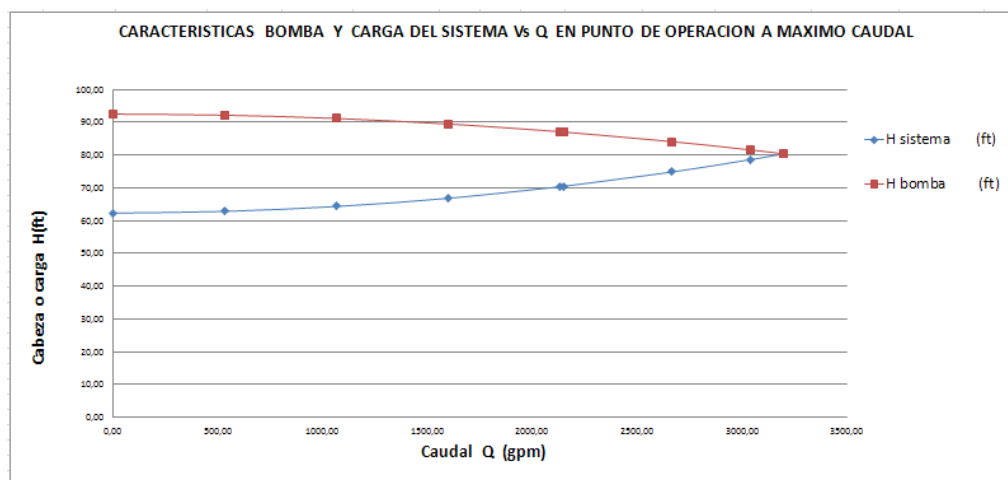
característica de la bomba construida con la herramienta en Excel, anexo J, junto con la curva de carga del sistema y el punto de operación de referencia.

Figura 47. Curva de carga sistema inyección obtenido con la herramienta en Excel



Fuente: El autor

Figura 48. Curva de carga bomba y carga del sistema obtenido con la herramienta en Excel



Fuente El autor

Tabla 16. Cuadros de Pérdidas y eficiencias de conductores, motor, bomba sistema de bombeo inyección azúcar refinada

Conductores Eléctricos - Motor bomba de azúcar refinado		
Parametros	Val.operación 1	Val.operación 2
factor de potencia	0,92	0,92
α_1 (Rad)	0,40	0,40
$\text{sen}\alpha_1$	0,39	0,39
Corriente I_2 (A)	154,00	166,00
Corriente Activa I_{A1} (A)	141,68	152,72
Corriente Reactiva I_{R1} (A)	60,36	65,06
Conductores		
Resistencia R (Ω /km)	0,33	0,33
Reactancia inductiva L (Ω /km)	0,14	0,14
Impedancia eficaz Z_e (Ω /km)	0,36	0,36
Distancia del circuito D(m)	150,00	150,00
Impedancia eficaz Z_e (Ω)	0,05	0,05
Pérdidas por efecto joule P(Kw)	3,81	4,43
Motor 170 Hp		
Parametros	Val.operación 1	Val.operación 2
Potencia activa (KW)	109	117
Velocidad angular(RPM)	1782	1782
Torque (Nm)		
Potencia Mecanica Eje del Motor (KW)	99,190	106,470
Eficiencia	91%	91%
Bomba de inyeccion azúcar refinada		
Parametros	Val.operación 1	Val.operación 2
Densidad Agua (kg/m ³)	995,631	995,631
Peso específico	9767,14011	9767,14011
Presion descarga (Psi)	40	30
Presion succion (Psi)		
ΔP (Pa)	275790	206842,5
Altura (m)	28,23651518	21,17738639
Caudal (m ³ /seg)	0,135755338	0,19177334
Potencia fluido (KW)	37,440	39,667
Eficiencia Bomba	37,75%	37,3%
Rendimiento sistema de bombeo		
Parametros	Operación 1	Operación 2
Potencia Activa Motor(KW)	109	117
Potencia mecanica eje (KW)	99,19	106,47
Potencia fluido (KW)	37,440	39,667
eficiencia motor	91,0%	91,0%
eficiencia Bomba	37,7%	37,3%
Eficiencia sistema	34,3%	33,9%

Fuente: Ibíd. p 149

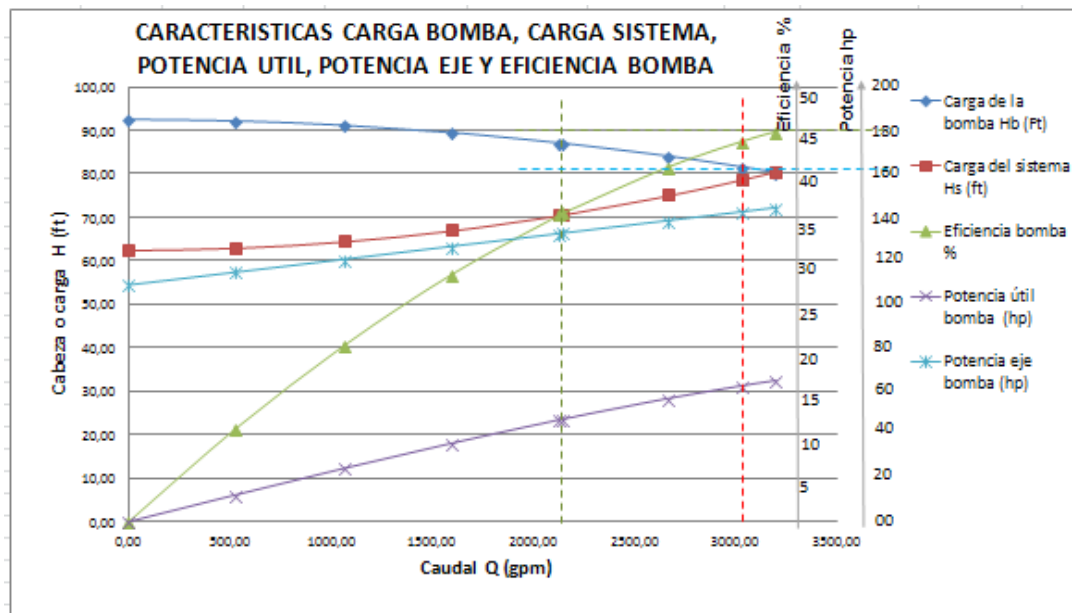
En la tabla 16 se muestra los cuadros con la información de pérdidas y eficiencias de los conductores, el motor, la bomba centrífuga, y eficiencia del sistema de bombeo de inyección de azúcar refinada, se presentan datos solamente sobre dos puntos de operación. Con solo dos puntos resulta insuficiente para realizar una

aplicación confiable, por lo cual se decide hacer una segunda aproximación. Debido a que en el estudio en el banco de pruebas las curvas de potencia en los componentes fue aproximadamente lineal, se decide extrapolar para el caso de aplicación del ingenio.

Se sigue la aplicación de la herramienta en Excel, anexo J, se completan las tablas con la información para cada componente y se grafican las características respectivas. En la figura 49 se muestra la gráfica con las curvas de carga bomba, carga sistema, potencia en el eje y útil de la bomba y la eficiencia de la bomba.

Se han trazado líneas para los dos puntos de operación, se observa que la eficiencia de la bomba no llega a su máxima punto con los caudales de trabajo.

Figura 49. Grafica con curvas de carga bomba, carga sistema, potencia en el eje y útil de la bomba y eficiencia de la bomba, obtenida con la herramienta en Excel



Fuente el autor

En la tabla 17 se muestra de la tesis, el cuadro resumen con la información de las pérdidas del sistema de inyección de azúcar.

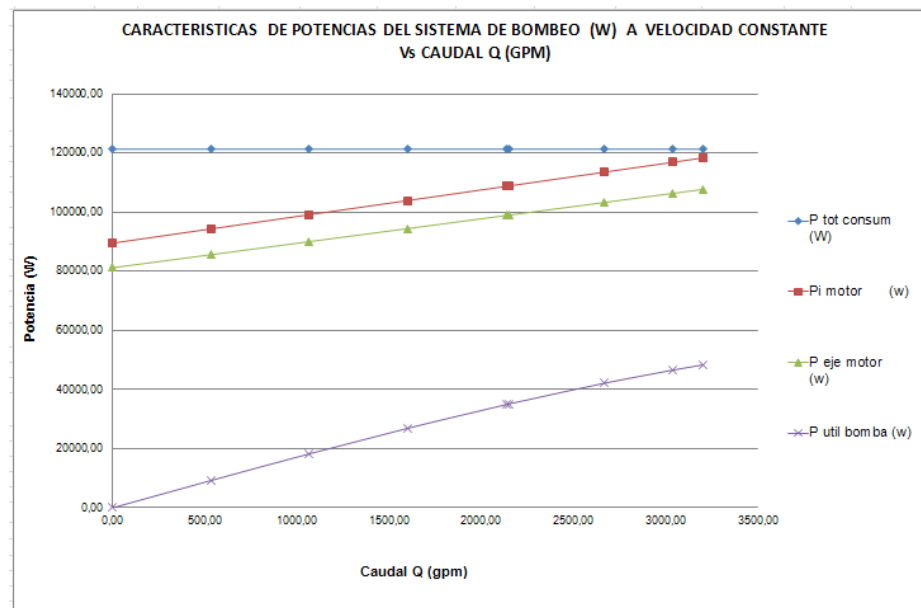
Tabla 17. Pérdidas de energía sistema electromecánico bombeo inyección azúcar

Pérdidas en los elementos	Energía (KWh)	Porcentaje de pérdidas	Energía (KWh-año)	Pérdidas \$
Conductores	4,43	4,7%	35700	\$ 7.140.068
motor	10,53	11,3%	84914	\$ 16.982.784
bomba	66,80	71,6%	538700	\$ 107.740.077
Tuberías y accesorios	11,55	12,4%	93152	\$ 18.630.302
Total	93,31		752466	\$ 150.493.231
Energía total entregada en el Barraje (KWh)				121,43
Energía entregada al fluido entrando a los condensadores (KWh)				28,12
Eficiencia total del sistema				23%

Fuente: Ibíd. p 151

Con la herramienta en Excel, anexo J, se construyen las características de potencia del sistema y las respectivamente características de eficiencia.

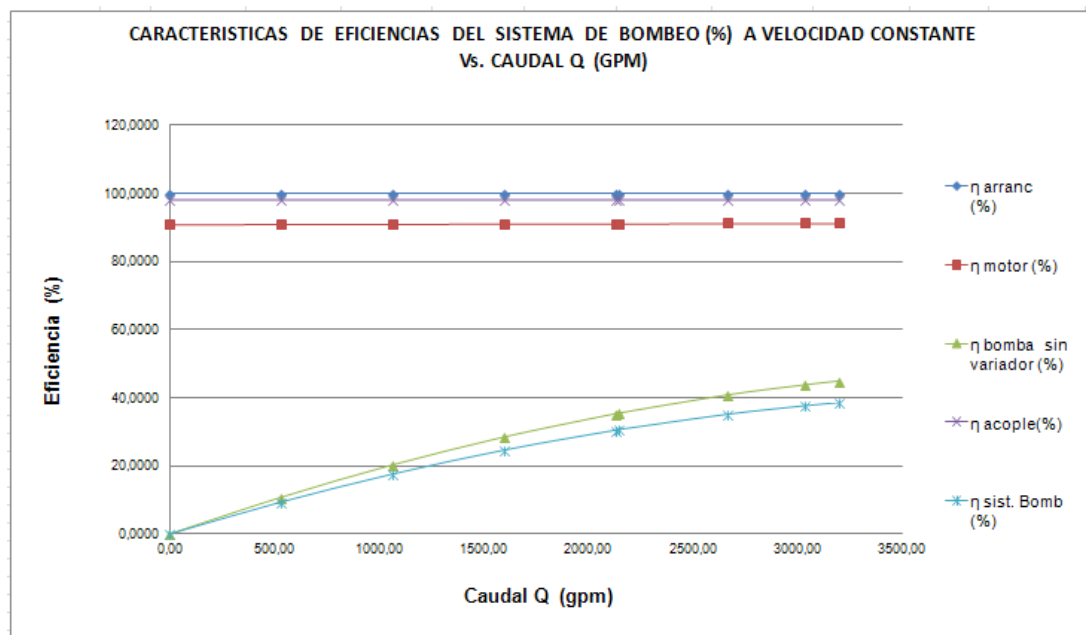
Figura 50. Características de potencia sistema de bombeo inyección azúcar



Fuente: El autor

En la figura 50 se muestra las características de potencia de cada componente y sistema completo de bombeo inyección azúcar y en la figura 51 las respectivas características de eficiencia.

Figura 51. Características de eficiencia de componentes y sistema de bombeo inyección de azúcar



Fuente: El autor

Con base en los resultados se puede concluir que la herramienta en Excel si es funcional, se pudo aplicar, teniendo en cuenta varias aproximaciones por falta de información de la tesis. La herramienta permite analizar el comportamiento para cada caudal y se puede afirmar que los resultados finales son muy congruentes con los obtenidos por la tesis. No se aplica la parte de la herramienta de evaluación económica, ya que en la tesis no se hicieron pruebas a velocidad variable y no es conveniente asumir comportamientos iguales a los obtenidos en el banco de pruebas, debido a las potencias manejadas en cada caso.

7 CONCLUSIONES

Mediante el estudio previo y conocimiento claro de cada uno de los componentes del sistema de bombeo se cumplió el objetivo general de plantear un modelo que permitió diagnosticar el comportamiento real en funcionamiento de cada uno de los componentes de este sistema, en el banco de prueba adaptado para el mismo.

A partir del análisis del sistema, definición del procedimiento, cálculos y pruebas se diseñó el modelo implementado que fue paso a paso siguiendo el comportamiento de cada componente, comenzando por la adecuada definición de las características de carga del sistema y de la bomba, facilitaron encontrar las diversas relaciones existentes entre cada componente, tanto funcionales como incidentales, que con la herramienta en Excel permitieron mostrar su comportamiento mediante las características respectivas

La herramienta en Excel permitió obtener las características de potencias y eficiencias de los componentes del sistema, encontrar y representar su funcionamiento en el punto y sector de mayor eficiencia a velocidad constante y variable en función del caudal. Con el conocimiento de los tiempos por caudal año y las eficiencias de los componentes eléctricos del sistema, se obtiene la potencia promedio año a velocidad constante y variable, permitiendo calcular el ahorro de energía por la diferencia del consumo entre las dos, se podrá incrementar ese ahorro en la medida que el proceso permita trabajar mayor tiempo año, con los caudales en que el sistema presenta la mayor eficiencia. Para el caso del proyecto, mediante simulación se logró incrementar el ahorro del orden de 87%.

La mayor eficiencia del sistema de bombeo utilizado a velocidad variable se obtuvo a una frecuencia de 25 Hz y el sector de mayor eficiencia está entre 20 y

30 Hz, esto corrobora la teoría, ya que al disminuir la velocidad la potencia en la bomba es proporcional a la variación de la velocidad al cubo

Debido al alto contenido armónico presente a la salida del variador de velocidad no fue posible tomar medida de ningún parámetro eléctrico en ese punto y hubo necesidad de tomar el conjunto variador de velocidad – motor como una caja negra y ya a la salida y entrada de ésta se tomaron las medidas correspondientes para conocer el comportamiento del conjunto.

Hallado el ahorro de energía como resultado de la implementación del variador de velocidad en el sistema, se presentó el proyecto energético de la implementación respectiva, que resulta muy útil y pertinente, en el cual se deben tener en cuenta todos los aspectos y costos relacionados con dicha implementación, para realizar el análisis de viabilidad correspondiente. , En el caso del proyecto, por ser un motor tan pequeño, alcanzo a dar viable, con una utilidad baja, pero para mayores potencias se puede esperar mayor utilidad. .

Para potencias pequeñas la incorporación del variador puede no resultar conveniente por los costos de desarrollo, justificación, montaje y producción del proyecto, los cuales tienen asociados estudios, búsqueda de información, actividades adicionales, etc, y como la potencia es pequeña, a pesar de presentar buen ahorro, puede no alcanzar a compensar los costos del proyecto o lo logra en un tiempo muy largo, lo cual no es muy atractivo para un proyecto actualmente.

El uso de variadores de velocidad con motores bomba generalmente presenta aportes muy importantes en ahorro de energía y debe asegurarse que el motor sea compatible para trabajar con variador de velocidad. El método implementado en Excel permite cuantificar los ahorros para motores medianamente pequeños medianos y grandes, el proyecto de implementación del variador de velocidad normalmente resulta viable, con todos los beneficios que esto implica.

La herramienta en Excel para analizar el proyecto energético resulta muy útil, siempre y cuando se tengan los parámetros o datos básicos para alimentar la herramienta y obtener el correspondiente resultado.

El proceso más dispendioso de la parte de implementación del banco de pruebas para poner el sistema de bombeo en funcionamiento y realizar las mediciones necesarias, fue la construcción de los soportes del nuevo motor de inducción adaptado al banco. La principal dificultad fue lograr mediante estos soportes la alineación del motor a la bomba, casi perfecta, que permitió un funcionamiento muy suave del conjunto motor bomba.

El motor trifásico de inducción utilizado no obedeció a un previo proceso riguroso de selección sino de oportunidad, estaba disponible en los laboratorios y por semejanza de potencia con respecto al motor C.C. inicial del banco de prueba, se tomó la decisión de utilizarlo.

La determinación de la eficiencia del acople motor bomba es una de las más complejas de hallar, por lo cual para este trabajo se trato de fundamentar las relaciones existentes y se relacionó con otras investigaciones realizadas, más no se pudo encontrar una relación exacta que permitiera hallar este valor y se definió con base en esas investigaciones y el marco teórico. Se expuso que experimentalmente se podría hallar esta eficiencia, pero eso sería motivo de otra investigación.

Se verificó que la eficiencia final del sistema de bombeo es el producto de las eficiencias parciales de sus componentes, por lo tanto la disminución significativa de cualquiera de las eficiencias de estos componentes afecta considerablemente la eficiencia de todo el sistema

Si se pudo evaluar la herramienta en Excel con el proyecto externo de un ingenio como se tenía previsto en uno de los objetivos específicos, y se vio su funcionalidad, pero hubo necesidad de manejar algunas restricciones, debido a la información insuficiente del proyecto del ingenio.

Por lo amplio del trabajo en cuanto al modelo y la herramienta en Excel implementada, resultan útiles los cuadros resumen de los mismos, para un mejor entendimiento.

8 RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar profundizando en ésta línea de investigación con proyectos adicionales para investigar a profundidad la incidencia del contenido armónico entregado por el variador de velocidad por frecuencia al motor y su incidencia en el comportamiento de la bomba, encontrar la causa de porque se presentan deficiencias en la bomba > 100% a velocidad variable regulada por el variador de velocidad.
- Se recomienda realizar pruebas adicionales siguiendo el modelo planteado, pero para otros tamaños de sistemas de bombeo e instalaciones industriales para potencias de motores mayores, clasificador por rangos y verificar el comportamiento de estos versus lo obtenido mediante el presente proyecto.
- Se recomienda realizar investigaciones o un proyecto encaminado a determinar en forma práctica y realizable, la eficiencia de los acoples utilizados en los sistemas de bombeo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Universidad del Atlántico Grupo de Gestión Eficiente de energía KAI. Universidad Autónoma de Occidente. Grupo de Investigación en Energías GIEN. Ahorro de energía en sistemas de bombas centrifugas. Un Proyecto de la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME).y Colciencias. 30 p. [Consultado el 15 de Diciembre de 2009]. Disponible en internet: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/bombas.pdf>
- [2] Jornet Atanasi, Motores de alta eficiencia. [Consultado en 13 de diciembre de 2009]. 10 p. Disponible en: internet: <http://www.motors-electrics.com/pdf/Motores%20de%20Alta%20Eficiencia%20Madrid.pdf>
- [3] Juha Viholainen, Energy-efficiency in Variable Speed Drive (VSD) controlled parallel pumping. Lappeenranta University of Technology, Finland. [Consultado el 15 de Diciembre de 2009]. Disponible en: <http://www1.cetim.fr/eemods09/pages/programme/006-Viholainen-final.pdf>
- [4] Aníbal de Almeida. Motors with Adjustable Speed Drives: Testing Protocol and Efficiency Standard. University of Coimbra, Portugal. [Consultado el 14 de diciembre de 2009] Disponible en internet: <http://www1.cetim.fr/eemods09/pages/programme/038-Brunner-final.pdf>
- [5] Martin Doppelbauer. Guide for the selection and application of energy-efficient motors. SEWE Urodrive GmbH, Germany. [Consultado el 14 de diciembre de 2009] Disponible en internet: [:http://www1.cetim.fr/eemods09/pages/programme/003-Doppelbauer-final.pdf](http://www1.cetim.fr/eemods09/pages/programme/003-Doppelbauer-final.pdf)

- [6] John Petro [Constructing High Efficiency Motors with Cost-Effective Materials](http://www1.cetim.fr/eemods09/pages/programme/044-Petro-final.pdf). Nova Torque, Inc., USA. [Consultado en 15 Diciembre 2009]. Disponible en internet: <http://www1.cetim.fr/eemods09/pages/programme/044-Petro-final.pdf>
- [7] Liwschitz-Garik, Michael. Máquinas de Corriente Alterna. Décima edición. México: Compañía Editorial Continental S.A, 1981. 767 p.
- [8] Stephen. J. Chapman. Máquinas Eléctricas. Bogotá: McGraw – Hill Latinoamericana S.A., 1897. 655 p. ISBN 968-422-149-5
- [9] Rojas, Héctor Fabio. Curso de drives para Motores. Universidad Autónoma de Occidente, Dirección de extensión, Educación continua. Septiembre 2005. 78 p
- [10] Percy R. Viego Felipe. Herramientas para el Uso Eficiente de Motores de Inducción en la Industria. Visitante centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA) Universidad de Cienfuegos–Cuba, Santiago de Cali Febrero 2008.
- [11] Universidad del Atlántico Grupo de Gestión Eficiente de energía KAI. Universidad Autónoma de Occidente. Grupo de Investigación en Energías GIEN. Eficiencia energética en motores eléctricos. Un Proyecto de la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME) y Colciencias
- [12] Kini, P.G. y Bansal, R.C. Effect of Voltage and Load Variations on Efficiencies of a Motor-Pump System. Energy Conversion, IEEE Transactions on , 2010, Page(s): 287 - 292 Volumen: 25, Issue: 2 . [Consultado el 15 de Octubre de 2011]. Disponible en internet: <http://ieeexplore.ieee.org/search>. ISSN: 0885-8969

[13] Kini, P.G., Bansal, R.C, Aithal, R.S., Performance Analysis of Centrifugal Pumps Subjected to Voltage Variation and Unbalance. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 55, Issue: 2, 2008, Page(s): 562 – 569. ISSN: 0278-0046

[14] Raju, A.B., Kanik, S.R. y Jyoti, R.; Maximum Efficiency Operation of a Single Stage Inverter Fed Induction Motor PV Water Pumping System, Emerging Trends in Engineering and Technology, 2008. ICETET '08. First International Conference on 2008, Page(s): 905 – 910. [Consultado el 15 de octubre de 2011]. Disponible en internet: <http://ieeexplore.ieee.org/search>. ISBN: 978-0-7695-3267-7

[15] Pottebaum, Joseph R, Optimal Characteristics of a Variable-Frequency Centrifugal Pump Motor Drive. Industry Applications, IEEE Transactions on. 1984, Page(s): 23 – 3. [Consultado el 15 de octubre de 2011]. Disponible en internet: <http://ieeexplore.ieee.org/search>. ISSN: 0093-9994

[16] Jones, W.V. Motor selection for centrifugal pump applications made easy. Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2011 Annual IEEE. 19-23 June 2011. [Consultado el 15 de octubre de 2011]. Disponible en internet: <http://ieeexplore.ieee.org/search>. ISBN: 978-1-61284-272-1

[17] Wu, P.; Chang, C.; Tseng, K.J. New concept of multi-phase inductively-driven shaft-less centrifugal pumps. Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference .2005, Page(s): 398 – 403. [Consultado el 15 de octubre de 2011]. Disponible en internet: <http://ieeexplore.ieee.org/search>. ISBN: 0-7803-8988-3

[18] Motor selection for centrifugal pump applications made easy. Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2011 Annual IEEE.

19-23 June 2011. [Consultado el 15 de octubre de 2011]. Disponible en internet: <http://ieeexplore.ieee.org/search>. ISBN: 978-1-61284-272-1

[19] Quispe O, Enrique C. y Mantilla Peñalba, Luis Fernando. Motores eléctricos de Alta eficiencia. GIEN. Grupo de investigación en energía. Universidad Autónoma de Occidente.. [Consultado el 15 de Octubre de 2011]. Disponible en internet: <http://ieeexplore.ieee.org/search>. ISSN: 0885-8969

[20] Mantilla Peñalba, Luis Fernando y Cardona Pardo, Juan Antonio. Gestión Energética de los motores eléctricos: mejora de la eficiencia de los accionamientos con el uso de variadores de velocidad. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. 8 p

[21] A-B Quality. Inversor de frecuencia. Power Flex 40, Inicio rápido. Diciembre 2008. 22 p. [Consultado 24 agosto 2011]. Disponible en internet: www.rockwellautomations.com

[22] Pacific Gas and Electric Company. Efficiency Opportunities with Adjustable Speed Drives. Depth Examination of an Energy Efficiency Technology, May 1

[23] Monteagudo Yanes, José. Borroto Nordelo, Anibal. Teyra, Marcos de Armas. Pérez Landín José. Montesino Pérez, Milagros. Montelíer Hernández, Sergio. AHORRO DE ENERGIA EN SISTEMAS TERMOMECAÑICOS. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos. Editorial Universidad de Cienfuegos, 2002. ISBN 959-257-045-0

[24] McNaughton, Kenneth. BOMBAS, Selección, uso y mantenimiento, Edit. Mc Graw Hill, 1988. ISBN 968-422-036-7

[25] Mataix, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, Ediciones del Castillo S.A., 2º edición 1986. ISBN 84-219-0175-3

[26] METODOS DE SELECCIÓN DE ACOPLER PARA SISTEMAS NAVALES.
Cuba: CIDNAV. A. Montero. A. Ramos. A. Isaac. [Consultado 28 de Mayo, 2011].
Disponible en Internet: <http://es.scribd.com/doc/73082307/Ct2-01-Metodos-de-seleccion>

[27] RENOLD Couplings, Resilient and soft start Couplings 4th edition. Renold Power Transmission Ltd. Ref 2000/ENG/ 02.02. p 08

[28] PG&E Energy Efficiency Information “Adjustable Speed Drive Opportunities” 2003. [Consultado el 16 de octubre de 2010]. Disponible en internet: http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/jabaez/clases/E886/Agosto_2003/Ahorro_sistemas_bombeo/SPEEDRIV.PDF

[29] Análisis de la norma IEC 60034-2-1. Aplicación en la determinación de las pérdidas y el rendimiento de motores de inducción trifásicos. 2009. Guardiola de Cabo, Luis Antonio. [Consultado el 2 de marzo de 2012. Disponible en internet: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/5455/1/resumen.pdf>

[30] Energy Efficient motor Driven. European Copper Institute. KU. Leuven and University of Coimbra. 2004. [Consultado 2 de julio 2012], Disponible en internet: <http://www.copperinfo.co.uk/motors/downloads/pub-176-energy-efficient-motor-driven-systems.pdf>

[31] “Metodología para la determinación de la eficiencia de máquinas asincrónicas en condiciones de campo. Caso de estudio” Universidad de Cien Fuegos. Cuba. [Consultado 13 de mayo de 2012]. Disponible en internet: <http://www.bibliociencias.cu/gsdl/collect/revistas/archives/HASHbef7.dir/doc.pdf>

[32] Castrillon, Rosaura. Oslinger, Jose Luis. Palacios, Jairo Arcesio In-Field Induction Motor Efficiency Determination Methods in the Scope of Efficiency-Based Maintenance. Energy Research Group GIEN. Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia. Energy Research Group CONVERGIA Universidad del Valle Cali, Colombia.

[33] Carlson, Ron The correct method of calculating energy savings to justify adjustable frequency drives on pumps. IEEE paper N° PCIC-99-26. 1999

[34] Método correcto de cálculo de ahorros de energía para justificar controladores de frecuencia variable en motores de bombas centrífugas. JMA 1998 ITESM Campus Monterrey.

[35] Karl, T. Ulrich. Steven D. Eppinger. Diseño y Desarrollo de Productos, enfoque multidisciplinario. México: McGraw – Hill Interamericana. 2004. 366 p ISBN 970-10-4793-1

[36] Yunus, A. Cengel. John, M. Cimbala. Mecánica de Fluidos. Fundamentos y aplicaciones. Mac Graw Hill. 2006. ISBN 13. 978-970-10-5612-7

[37] Emady, Ali. Energy Efficient Electric Motors. Third Edition revised and expanded. 2005. 406 p. ISBN: 0-8247-5735-1

[38] ROTATING ELECTRICAL MACHINES. Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests. IEC 60034-2-1: 2007.

[39] Determining the Efficiency of Induction Machines, Converters and Soft starters. 8 p. [Consultado 28 de Mayo, 2011]. Disponible en Internet: http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_164.pdf

[40] Chamorro Cuarán, José Andrés. Evaluación electromecánica y económica de las oportunidades de ahorro energético en los sistemas de bombeo de los ingenios azucareros colombianos. Trabajo de grado para optar al título de Maestría en Ingeniería con énfasis en Eléctrica. Santiago de Cali, Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Escuela de posgrados, 2011. 98 p.

[41] International Energy Sgency (IEA). Key World Energy Statistics [consultado 21 de Diciembre de 2012]. Disponible en Internet https://www.iea.org/publications/free_publications/publication/kwes.pdf